



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Επίδραση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και της
Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Ευστάθεια του
Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Καραϊσκού Βασιλική

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

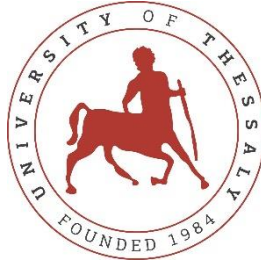
Επίδραση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και της
Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Ευστάθεια του
Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Καραϊσκού Βασιλική

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Impact of Renewable Energy Sources and Electric Vehicle
Charging on Power System Stability**

Diploma Thesis

Karaiskou Vasiliki

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

September 2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Λουτρίδης Σπυρίδων

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δασκαλοπούλου Ασπασία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

Βασιλική Καραϊσκού

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Vasiliki Karaïskou

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου σε όλα τα πρόσωπα που βοήθησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με οποιονδήποτε τρόπο.

Πρώτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτριο Μπαργιώτα, που ανέλαβε την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας και μου προσέφερε άμεσα και ουσιαστικά την καθοδήγηση του όποτε την χρειαζόμουν. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Κωνσταντίνο Πιπή για την άριστη συνεργασία που είχαμε. Η αδιάλειπτη βοήθεια και οι πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου αποτέλεσαν καταλυτικό παράγοντα στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής αξιολόγησης, τον κύριο Σπυρίδωνα Λουτρίδη και την κυρία Ασπασία Δασκαλοπούλου, που αποδέχτηκαν να είναι μέλη της επιτροπής εξέτασης και για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά και τους φίλους μου για την αμέριστη αγάπη, την υποστήριξή τους και για την πίστη τους σε εμένα, που με βοήθησαν να ανταπεξέλθω σε κάθε πρόκληση στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

**Επίδραση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και της
Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Ευστάθεια του
Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας**
Καραϊσκού Βασιλική

Περίληψη

Η σταδιακή εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών πόρων και η περιβαλλοντική ανησυχία λόγω της κλιματικής αλλαγής είναι οι κυριότεροι λόγοι που εγείρει την ανάγκη για στροφή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Βέβαια, οι συγκεκριμένες μορφές ενέργειας παρουσιάζουν εξάρτηση από φυσικούς πόρους (π.χ. ήλιος, άνεμος), εισάγοντας στοχαστικότητα στην παραγωγή τους, γεγονός που καθιστά όλο και πιο δύσκολη την άμεση και συνεχή ανταπόκριση στη ζήτηση. Τη λύση σε αυτό το ζήτημα έρχεται να δώσει η αποθήκευση ενέργειας η οποία επιτρέπει τη συσσώρευση της παραγόμενης ενέργειας σε περιόδους υψηλής παραγωγής και την απελευθέρωσή της σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ή υψηλής ζήτησης.

Οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν ανοίξει τον δρόμο για τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία με ενσωματωμένες λειτουργίες, όπως η τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G) μπορούν να φέρουν εις πέρας τον ρόλο του κινητού μέσου αποθήκευσης ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ένα σύστημα 12 ζυγών παρουσία ενός αιολικού πάρκου και ενός υδροηλεκτρικού σταθμού. Μελετώνται σενάρια λειτουργίας τα οποία έχουν ως βάση τη διακύμανση της ενεργειακής ζήτησης και τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκρίνεται η συμπεριφορά του δικτύου με και χωρίς την παρουσία ενός μεγάλου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων που εκτελεί έξυπνη αμφίδρομη φόρτιση και στοχεύει στην εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης ανά πάσα στιγμή.

Λέξεις-κλειδιά:

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ηλεκτρικά Οχήματα, Ευστάθεια Συστήματος, Ανάλυση Ροής Φορτίου, Ευφύες Δίκτυο, Αιολικό Πάρκο, Υδροηλεκτρικός Σταθμός, Έξυπνη Φόρτιση

Impact of Renewable Energy Sources and Electric Vehicle Charging on Power System Stability

Karaiskou Vasiliki

Abstract

The gradual depletion of fossil fuels and the environmental concerns due to climate change are the main reasons that have raised the need to move towards electricity generation from Renewable Energy Sources. However, these forms of energy are dependent on natural resources (e.g., sun, wind), introducing stochastic behaviour in production, which makes it increasingly difficult to respond to demand immediately and continuously. Energy storage systems provide a solution to this problem by storing generated energy during high production periods and releasing it during low production or high demand periods.

Recent technological advancements have paved the way for electric vehicles, with new incorporated technologies such as Vehicle-to-Grid (V2G) can fulfill the role of mobile energy storage systems.

In this thesis, a 12-bus system is examined in the presence of a wind farm and a hydroelectric power station. Operating scenarios are studied based on the energy demand and the availability of renewable energy sources. The behavior of the grid is compared with and without the presence of an electric vehicle charging fleet with bidirectional charging technology, aiming at balancing production and demand at all times.

Keywords:

Power System, Renewable Energy Sources, Electric vehicles, Power System Stability, Power Flow Analysis, Smart Grid, Wind Farm, Hydroelectric Power Station, Smart Charging

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	xiii
Περίληψη.....	xv
Abstract	xvii
Κατάλογος Εικόνων	xxiii
Κατάλογος Σχημάτων	xxxv
Κατάλογος Πινάκων	xxxvi
Συνοτομογραφίες	xxxviii
Κεφάλαιο 1	41
Εισαγωγή στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	41
1.1 Ιστορική Αναδρομή	41
1.2 Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	42
1.2.1 Παραδοσιακό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	43
1.2.2 Το ευφύες δίκτυο	45
1.3 Ενεργειακοί Στόχοι.....	47
1.3.1 Ευρωπαϊκοί Στόχοι	48
1.3.2 Οι εθνικοί ενεργειακοί στόχοι της Ελλάδας	48
1.4 Οργάνωση του τόμου	51
Κεφάλαιο 2	53
Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	53
2.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	53
2.2 Ανάλυση Ροής Φορτίου.....	53
2.2.1 Ταξινόμηση Ζυγών	54
2.2.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου	55
2.2.3 Επαναληπτικές Αριθμητικές Μέθοδοι	57
2.3 Ευστάθεια Σ.Η.Ε	58
2.3.1. Ευστάθεια Γωνίας Ρότορα.....	59
2.3.2. Ευστάθεια Συχνότητας.....	59

2.3.3 Ευστάθεια Τάσης.....	60
2.4 Ρύθμιση συχνότητας και ισοζύγιο ισχύος	60
2.4.1 Ρυθμιστής Στροφών	63
2.4.2 Στατισμός	63
2.5 Έλεγχος Άεργης Ισχύος - Τάσης	65
2.5.1 Ρυθμιστής Τάσης	66
2.6 Όρια Λειτουργίας	67
Κεφάλαιο 3	68
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	68
3.1 Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	68
3.2 Ηλιακή Ενέργεια.....	68
3.3 Γεωθερμική Ενέργεια.....	69
3.4 Βιομάζα.....	69
3.5 Υδροηλεκτρική Ενέργεια	69
3.5.1 Ταξινόμηση Υδροηλεκτρικών Σταθμών	70
3.5.2 Είδη Τουρμπινών.....	71
3.6 Αιολική Ενέργεια	73
3.6.1 Τύποι Ανεμογεννητριών.....	73
3.6.2 Υποσυστήματα Ανεμογεννητριών	73
3.6.3 Ηλεκτρογεννήτριες	75
3.7 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών	79
Κεφάλαιο 4.....	81
Ηλεκτροκίνηση	81
4.1 Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Οχήματα	81
4.2 Μπαταρία.....	81
4.2.1 Μπαταρίες μολύβδου – οξέως (Lead-Acid)	82
4.2.2 Μπαταρία Νικελίου - Υδριδίου του Μετάλλου (Ni-MH)	82
4.2.3 Μπαταρία Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd)	82
4.2.4 Μπαταρία ιόντων λιθίου (Li- Ion)	82
4.3 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων	83
4.4 Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	84

4.5 Vehicle to Grid (V2G)	86
4.6 Επίπεδα Φόρτισης	87
4.7 Συμμετέχοντες στην τεχνολογία V2G	88
4.8 Οφέλη αμφίδρομης φόρτισης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	90
4.9 Έργα Vehicle-to-Grid ανά τον Κόσμο.....	91
4.10 Στρατηγικές φόρτισης για τη ρύθμιση συχνότητας	92
4.10.1 Στοιχειώδης έλεγχος - Elementary Control (ElCo)	92
4.10.2 Έλεγχος Ισορροπίας - Balance Control (BaCo).....	94
4.10.3 Έξυπνος Έλεγχος Φόρτισης - Smart Charging Control (SmChCo)	95
4.10.4 Περιορισμένος Έλεγχος – Bounded Control (BoCo)	96
Κεφάλαιο 5.....	98
Μοντελοποίηση Συστήματος	98
5.1 Περιγραφή Δοκιμαστικού Συστήματος	98
5.2 Το λογισμικό PowerWorld Simulator	99
5.3 Μοντελοποίηση Σταθμών Παραγωγής	101
5.4 Μοντελοποίηση διαδικασίας φόρτισης	104
5.4.1 Λειτουργία Φόρτισης και Εκφόρτισης (REEC_C)	104
5.4.2 Λειτουργία Ρύθμισης Συχνότητας (REPC_A).....	106
5.4.3 Παράσταση Περιορισμένου Ελέγχου με τα μοντέλα REEC_C, REPC_A.....	108
5.5 Προσομοίωση Συστήματος	109
5.6 Παραδοχές για την εξομοίωση της υπηρεσίας V2G.....	111
5.7 Περιγραφή και Επίλυση Προβλήματος	112
Κεφάλαιο 6.....	113
Μελέτη μεταβατικών καταστάσεων.....	113
6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	113
Σενάριο 1: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου (V2G)	114
Σενάριο 2: Μείωση της Παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού (V2G)	163
Σενάριο 3: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στους ζυγούς φορτίων (V2G).....	177
Σενάριο 4: Μείωση της ζήτησης στα φορτία των ζυγών (G2V)	208
Σενάριο 5: Αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου (G2V).....	234

6.2 Σύνοψη και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	250
Κεφάλαιο 7.....	252
Επίλογος	252
7.1 Συμπεράσματα και Προκλήσεις.....	252
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	252
Βιβλιογραφία.....	255
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	258
Στοιχεία δοκιμαστικού συστήματος.....	258
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	261
Διαγράμματα μπλοκ μοντέλων προσομοίωσης	261

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα.....	42
Εικόνα 1.2: Βασική Δομή Σ.Η.Ε	43
Εικόνα 1.3: Αρχιτεκτονική ευφυούς δικτύου.....	46
Εικόνα 2. 1: Αναπαράσταση δικτύου για εξαγωγή εξισώσεων ροής φορτίου.....	55
Εικόνα 2.2: Ανισορροπίες του ενεργειακού ισοζυγίου	61
Εικόνα 2.3: Πρωτεύουσα Ρύθμιση	62
Εικόνα 2.4: Καμπύλη στατισμού (droop)	64
Εικόνα 2.5: Μοντέλο διασύνδεσης ζυγών μέσω γραμμής μεταφοράς με αντίσταση και επαγωγική αντίδραση	65
Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστική καμπύλη αέργου ισχύος συναρτήσει της τάσης (QV)	66
Εικόνα 3.1: Στρόβιλος Pelton.....	72
Εικόνα 3.2: Στρόβιλος Kaplan	72
Εικόνα 3.3: Υποσυστήματα Α/Γ.....	75
Εικόνα 3.4: Τύποι Ανεμογεννητριών.....	77
Εικόνα 4.1: (a) Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (HEVs), (b) Όχημα με Υβριδικό Ηλεκτρικό Κινητήρα και δυνατότητα Φόρτισης (PHEV), (c) Ηλεκτρικό Όχημα Μπαταρίας (BEV), (d) Όχημα με κυψέλη καυσίμου (FCEV)	84
Εικόνα 4.2: Μη ελεγχόμενη φόρτιση μονής κατεύθυνσης	85
Εικόνα 4.3: Έξυπνη φόρτιση μονής κατεύθυνσης	85
Εικόνα 4.4: Διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση	85
Εικόνα 4.5: Διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση με ροή ενέργειας απευθείας στο δίκτυο	86
Εικόνα 4.6: Αρχή λειτουργίας τεχνολογίας V2G	86
Εικόνα 4.7: Ροή ισχύος στοιχειώδους ελέγχου	93
Εικόνα 4.8: Ροή ισχύος ελέγχου ισορροπίας	94
Εικόνα 4.9: Ροή ισχύος έξυπνου ελέγχου φόρτισης	96
Εικόνα 4.10: Ροή ισχύος περιορισμένου ελέγχου	97
Εικόνα 5.1: Γενικό μοντέλο 12 ζυγών	98
Εικόνα 5.2: Περιβάλλον λειτουργίας Transient Stability	100
Εικόνα 5.3: Παράθυρο εισαγωγής διαταραχών.....	101
Εικόνα 5.4: Δομή συνολικού μοντέλου εξομοίωσης Α/Γ τύπου 3.....	103
Εικόνα 5.5: Μοντέλο συστήματος αποθήκευσης με μπαταρία	104
Εικόνα 5.6: Διαδικασία τερματισμού φόρτισης ή αποφόρτισης	106
Εικόνα 5.7: Κατανομή Πραγματικής και Άεργης Ισχύος	106

Εικόνα 5.8: Διάγραμμα Ρύθμισης Συχνότητας με το μοντέλο REPC_A.....	107
Εικόνα 5.9: Μοντελοποιημένο σύστημα 12 ζυγών στο PowerWorld Simulator	110
Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα Ανάλυσης Φορτίου.....	110
Εικόνα 5.11: Απεικόνιση Συστήματος μετά από την εισαγωγή του μοντέλου φόρτισης..	111
Εικόνα 6.1: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, απουσία V2G	116
Εικόνα 6.2: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=50$	116
Εικόνα 6.3: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=100$	117
Εικόνα 6.4: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=200$	117
Εικόνα 6.5: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=300$	118
Εικόνα 6.6: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=400$	118
Εικόνα 6.7: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, απουσία V2G	119
Εικόνα 6.8: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=50$	120
Εικόνα 6.9: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=100$	121
Εικόνα 6.10: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=200$	121
Εικόνα 6.11: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=300$	122
Εικόνα 6.12: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dup}=400$	122
Εικόνα 6.13: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=50$	124
Εικόνα 6.14: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=100$	124
Εικόνα 6.15: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=200$	125
Εικόνα 6.16: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=300$	125
Εικόνα 6.17: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=400$	126
Εικόνα 6.18: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=50$	127
Εικόνα 6.19: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dup}=100$	128

Εικόνα 6.42: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=200$	141
Εικόνα 6.43: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=300$	142
Εικόνα 6.44: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=400$	142
Εικόνα 6.45: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=50$	144
Εικόνα 6.46: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=100$	144
Εικόνα 6.47: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=200$	145
Εικόνα 6.48: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=300$	145
Εικόνα 6.49: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=400$	146
Εικόνα 6.50: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=50$	146
Εικόνα 6.51: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=100$	147
Εικόνα 6.52: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=200$	147
Εικόνα 6.53: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=300$	148
Εικόνα 6.54: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $\text{dur}=400$	148
Εικόνα 6.55: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου απουσία V2G.....	150
Εικόνα 6.56: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur}=50$	150
Εικόνα 6.57: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur}=100$	151
Εικόνα 6. 58: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur}=200$	151
Εικόνα 6.59: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur}=300$	152
Εικόνα 6.60: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου απουσία V2G	153
Εικόνα 6.61: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$	153
Εικόνα 6.62: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	154
Εικόνα 6.63: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G λειτουργίας με $\text{dur} = 200$	154

Εικόνα 6.64: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$	155
Εικόνα 6.65: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$	156
Εικόνα 6.66: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$..	156
Εικόνα 6.67: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 200$..	157
Εικόνα 6.68: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$..	157
Εικόνα 6.69: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου, παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$	159
Εικόνα 6.70: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου, παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	159
Εικόνα 6.71: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 200$	160
Εικόνα 6.72: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$	160
Εικόνα 6.73: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$	161
Εικόνα 6.74: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	161
Εικόνα 6.75: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 200$	162
Εικόνα 6.76: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$	162
Εικόνα 6.77: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,απουσία V2G.....	164
Εικόνα 6.78: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$.	164
Εικόνα 6.79: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	165
Εικόνα 6.80: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 200$	165
Εικόνα 6.81: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$	166
Εικόνα 6.82: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,απουσία V2G.....	167
Εικόνα 6.83: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$.	167
Εικόνα 6.84: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	168
Εικόνα 6.85: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 200$	168

Εικόνα 6.86: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 300169	
Εικόνα 6.87: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 50.....	170
Εικόνα 6.88: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 100.....	170
Εικόνα 6.89: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 200.....	171
Εικόνα 6.90: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 300.....	171
Εικόνα 6.91: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 50 .	173
Εικόνα 6.92: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 100	173
Εικόνα 6.93: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 200	174
Εικόνα 6.94: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 300	174
Εικόνα 6.95: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 50.....	175
Εικόνα 6.96: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10%, παρουσία V2G με dup = 100.....	175
Εικόνα 6.97: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 200.....	176
Εικόνα 6.98: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με dup = 300.....	176
Εικόνα 6.99: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία V2G	178
Εικόνα 6.100: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G dup = 50	178
Εικόνα 6.101: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με dup = 100.....	179
Εικόνα 6.102: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με dup = 200.....	179
Εικόνα 6.103: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με dup = 300.....	180
Εικόνα 6.104: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με dup = 400.....	180
Εικόνα 6.105: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με dup = 500.....	181

Εικόνα 6.125: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 50$	192
Εικόνα 6.126: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	193
Εικόνα 6.127: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 200$	193
Εικόνα 6.128: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$	194
Εικόνα 6.129: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 400$	194
Εικόνα 6. 130: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 500$	195
Εικόνα 6.131: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,απουσία V2G.....	196
Εικόνα 6.132: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 20$	197
Εικόνα 6.133: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 30$	197
Εικόνα 6.134: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	198
Εικόνα 6.135: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,απουσία V2G.....	199
Εικόνα 6.136: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 10$	199
Εικόνα 6.137: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 20$	200
Εικόνα 6.138: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 30$	200
Εικόνα 6.139: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	201
Εικόνα 6.140: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 10$	202
Εικόνα 6.141: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 20$	202
Εικόνα 6.142: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 30$	203
Εικόνα 6.143: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$	203
Εικόνα 6. 144: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dur} = 10$	204

Εικόνα 6.145: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 20$	205
Εικόνα 6.146: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 30$	205
Εικόνα 6.147: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 100$	206
Εικόνα 6.148: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 10$	206
Εικόνα 6.149: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 20$	207
Εικόνα 6.150: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 30$	207
Εικόνα 6.151: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $\text{dup} = 100$	208
Εικόνα 6. 152: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% ,απουσία G2V	209
Εικόνα 6.153: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 50$	210
Εικόνα 6.154: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 100$	210
Εικόνα 6.155: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 200$	211
Εικόνα 6.156: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% ,απουσία G2V	212
Εικόνα 6. 157: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 50$	212
Εικόνα 6.158: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 100$	213
Εικόνα 6.159: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 200$	213
Εικόνα 6. 160: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 50$	215
Εικόνα 6.161: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 100$	215
Εικόνα 6.162: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 200$	216
Εικόνα 6.163: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 50$	217
Εικόνα 6.164: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $\text{ddn} = 100$	218

Εικόνα 6.165: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$	218
Εικόνα 6.166: Άεργος Ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 50$	219
Εικόνα 6.167: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 100$	219
Εικόνα 6.168: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$	220
Εικόνα 6. 169: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία G2V	221
Εικόνα 6.170: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$	222
Εικόνα 6.171: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$	222
Εικόνα 6.172: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$	223
Εικόνα 6.173: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$	223
Εικόνα 6.174: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία G2V λειτουργίας	224
Εικόνα 6.175: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 50$	225
Εικόνα 6.176: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$	225
Εικόνα 6.177: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$	226
Εικόνα 6.178: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$	226
Εικόνα 6.179: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 50$	227
Εικόνα 6.180: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$	228
Εικόνα 6.181: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$	228
Εικόνα 6.182: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$	229
Εικόνα 6.183: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 50$	230
Εικόνα 6.184: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$	230

Εικόνα 6.185: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$	231
Εικόνα 6.186: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$	231
Εικόνα 6.187: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 50$	232
Εικόνα 6.188: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$	232
Εικόνα 6.189: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$	233
Εικόνα 6.190: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$	233
Εικόνα 6. 191: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,απουσία G2V	235
Εικόνα 6.192: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$	235
Εικόνα 6.193: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$	236
Εικόνα 6.194: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$	236
Εικόνα 6.195: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$	237
Εικόνα 6.196: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$	237
Εικόνα 6.197:Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,απουσία G2V	238
Εικόνα 6.198: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$	239
Εικόνα 6.199: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$	239
Εικόνα 6.200: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$	240
Εικόνα 6.201: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$	240
Εικόνα 6.202: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$	241
Εικόνα 6.203: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$	242
Εικόνα 6.204: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$	242

Εικόνα 6.205: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$	243
Εικόνα 6.206: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$	243
Εικόνα 6.207: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$	244
Εικόνα 6.208: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$	245
Εικόνα 6.209: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$	245
Εικόνα 6.210: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$	246
Εικόνα 6.211: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$	246
Εικόνα 6.212: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$	247
Εικόνα 6.213: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$	247
Εικόνα 6.214: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$	248
Εικόνα 6.215: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$	248
Εικόνα 6.216: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$	249
Εικόνα 6.217: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$	249
Εικόνα B.1: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου μηχανής GENTPJ	261
Εικόνα B.2: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλων μηχανής REGC_A	261
Εικόνα B.3: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου διεγέρτη ESST4B	262
Εικόνα B.4: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου διεγέρτη REGC_A	262
Εικόνα B.5: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου σταθεροποιητή PSS2A	263
Εικόνα B.6: Διάγραμμα μπλοκ ρυθμιστή ταχύτητας GGOV1	263
Εικόνα B.7: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου εξομοίωσης του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης WTGT_A	264
Εικόνα B.8: Διάγραμμα μπλοκ ρυθμιστή ταχύτητας YHS HYGOV	264
Εικόνα B.9: Διάγραμμα μπλοκ ελεγκτή REPC_A	265
Εικόνα B.10: Διάγραμμα μπλοκ αεροδυναμικού μοντέλου WTGAR_A	265
Εικόνα B.11: Μοντέλο ελέγχου ροπής A/Γ WTRQ_A	266

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τύποι σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	44
Σχήμα 1.2: Πορεία μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου	49
Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση Ευστάθειας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών του συμβατικού και του ευφυούς δικτύου.....	47
Πίνακας 1. 2: Προβλεπόμενη ποσότητα διείσδυσης H/O στην αγορά	50
Πίνακας 2.1.:Ταξινόμηση μεταβλητών ροής φορτίου	54
Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμός Υδροηλεκτρικού έργου με κριτήριο την εγκατεστημένη ισχύ	71
Πίνακας 4.1: Συνήθη Επίπεδα Φόρτισης	88
Πίνακας 5.1: Μοντέλα προσομοίωσης σταθμών παραγωγής	103
Πίνακας 5.2: Δεδομένα για την εξομοίωση της έξυπνης αμφίδρομης φόρτισης	112
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 1.1.....	115
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 1.1.	123
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 1.1	127
Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 1.2.....	133
Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 1.2.	140
Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 1.2	143
Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 1.3.....	149
Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 1.3	155
Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 1.3	158
Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 2.1.....	163
Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 2.1	169
Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 2.1	172
Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 3.1.....	177
Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 3.1.....	185
Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 3.1	189
Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 3.2.....	196

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 3.2.....	201
Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 3.2	204
Πίνακας 6.19: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 4.1.....	209
Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 4.1.....	214
Πίνακας 6.21: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 4.1	217
Πίνακας 6.22: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 4.2.....	220
Πίνακας 6.23: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 4.2.....	227
Πίνακας 6.24: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης Σεναρίου 4.2	229
Πίνακας 6.25: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 5.1.....	234
Πίνακας 6.26: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 5.1.....	241
Πίνακας 6.27: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 5.1.....	244
 Πίνακας A.1: Ονομαστικές Τιμές Λειτουργίας Γεννητριών.....	 258
Πίνακας A.2: Ονομαστικές Τιμές Λειτουργίας Μετασχηματιστών	258
Πίνακας A.3: Δεδομένα Γραμμών Μεταφοράς.....	258
Πίνακας A.4: Δεδομένα Ζυγών για την Ανάλυση Ροής Φορτίου	259

Συντομογραφίες

A/Γ	Ανεμογεννήτρια
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΡΠ	Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής
E.E	Ευρωπαϊκή Ένωση
E.P.	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
H/O	Ηλεκτρικά Οχήματα
M.T	Μέση Τάση
Σ.Η.Ε	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Σ.Ρ.	Συνεχές Ρεύμα
Υ.Τ	Υψηλή Τάση
Χ.Τ	Χαμηλή Τάση
ΥΗΕ	Υδροηλεκτρικό Έργο
ΥΗΣ	Υδροηλεκτρικός Σταθμός
AC	Alternating Current
AGC	Automatic Generation Control
BaCo	Balance Control
BEV	Battery Electric Vehicle
BoCo	Bounded Control
DC	Direct Current
Ddn	Downside Droop
Dup	Upside Droop
ElCo	Elementary Control
FAN	Field Area Network
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
G2V	Grid To Vehicle
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
HEV	Hybrid Electric Vehicle
IEA	International Energy Agency
ICT	Information and Communication Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

ISO	International Organization of Standardization
Li-Ion	Lithium-Ion
NAN	Neighbourhood Area Network
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metal Hydride
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
SmChCo	Smart Charging Control
SOC	State of Charge
V2B	Vehicle to Building
V2G	Vehicle to Grid
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
VPP	Virtual Power Plant
WAN	Wide Area Network
WECC	Western Electricity Coordinating Council

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο ηλεκτρισμός χρονολογείται από την αρχαία εποχή με τις πρώτες μορφές του που έρχονται σε επαφή οι άνθρωποι να αφορούν εκείνες που συμβαίνουν λόγω φυσικών φαινομένων όπως ο κεραυνός ή να προκύπτουν από απλές δραστηριότητες όπως η τριβή. Η αρχή στην επιστημονική έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο έγινε με την μελέτη του στατικού ηλεκτρισμού που εκφράζει την ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που περιέχεται σε ένα αντικείμενο. Η δημιουργία της ηλεκτρογεννήτριας μετά την ανακάλυψη του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής από τον Άγγλο φυσικό Michael Faraday άνοιξε τον δρόμο για το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Αγγλία το 1881 το οποίο αξιοποιούσε την δυναμική της υδροηλεκτρικής ενέργειας και είχε ως στόχο να καλύψει τις ανάγκες ιδιωτικών ιδιοκτησιών [1].

Έτσι, η ανανεώσιμη ενέργεια αποτελούσε μία από τις βασικότερες ενεργειακές πηγές κατά το μεγαλύτερο μέρος της ανθρώπινης ιστορίας. Η ανησυχία για την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης τους αποτέλεσε καταλύτη για την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το εμπάργκο στις εξαγωγές πετρελαίου που επιβλήθηκε από τις Αραβικές Χώρες και οδήγησε σε πετρελαϊκή κρίση το 1973, ήταν ένα σημείο καμπής που ώθησε την παγκόσμια κοινότητα να αναζητήσει και να επενδύσει σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [2].

Το πλαίσιο της περιβαλλοντικής ανησυχίας και της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας έφερε στο προσκήνιο μία ακόμα ανακάλυψη, αυτή των ηλεκτρικών οχημάτων (Η/Ο). Η ιστορία των Η/Ο ξεκινά από τις αρχές του 19ου αιώνα με την καθοριστική ανακάλυψη της μπαταρίας από τον Alessandro Volta. Η μπαταρία πυροδότησε πολλές νέες δυνατότητες καθώς ήταν πλέον εφικτή η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βρετανός εφευρέτης Thomas Parker κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο το 1884 το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά επιβατών σε αστικές περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου και φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Τα ηλεκτρικά οχήματα του παρελθόντος, λόγω

της περιορισμένης απόδοσης των μπαταριών σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος, απέτυχαν να κερδίσουν την ευρεία αποδοχή. Σήμερα όμως, η παρουσία τους στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι αισθητή. Η τεχνολογία των μπαταριών έχει βελτιωθεί σημαντικά, προσφέροντας μεγαλύτερη αυτονομία και απόδοση, ενώ οι προσπάθειες για την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης έχουν ενισχυθεί, κάνοντας τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων πιο βολική και προσιτή στο ευρύ κοινό [3].



Εικόνα 1.1: Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα [4]

Η ανάγκη για αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας μετά την αυξημένη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και των Ηλεκτρικών Οχημάτων (Η/Ο), σε συνδυασμό πολλές άλλες τεχνολογικές και λειτουργικές βελτιώσεις, οδήγησε στην αναδιαμόρφωση του παραδοσιακού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω, αναλύεται η βασική δομή και λειτουργία του κλασσικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στη συνέχεια, περιγράφεται μετά τη μετάβασή του σε ένα πιο ευέλικτο, αποδοτικό και βιώσιμο δίκτυο, γνωστό ως ευφυές δίκτυο.

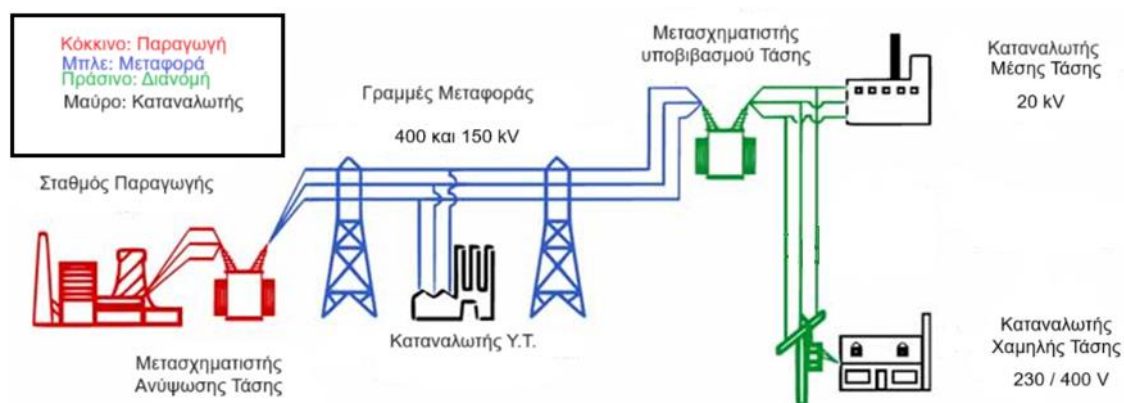
1.2 Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε) ορίζεται το σύνολο των υποδομών και διατάξεων που απαιτούνται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών, ενός συνόλου διεσπαρμένων καταναλωτών, σε ηλεκτρική ενέργεια. Στόχος ενός Σ.Η.Ε είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα κέντρα κατανάλωσης με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζεται:

- Συνέχεια
- Ασφάλεια
- Ποιότητα
- Οικονομία [5].

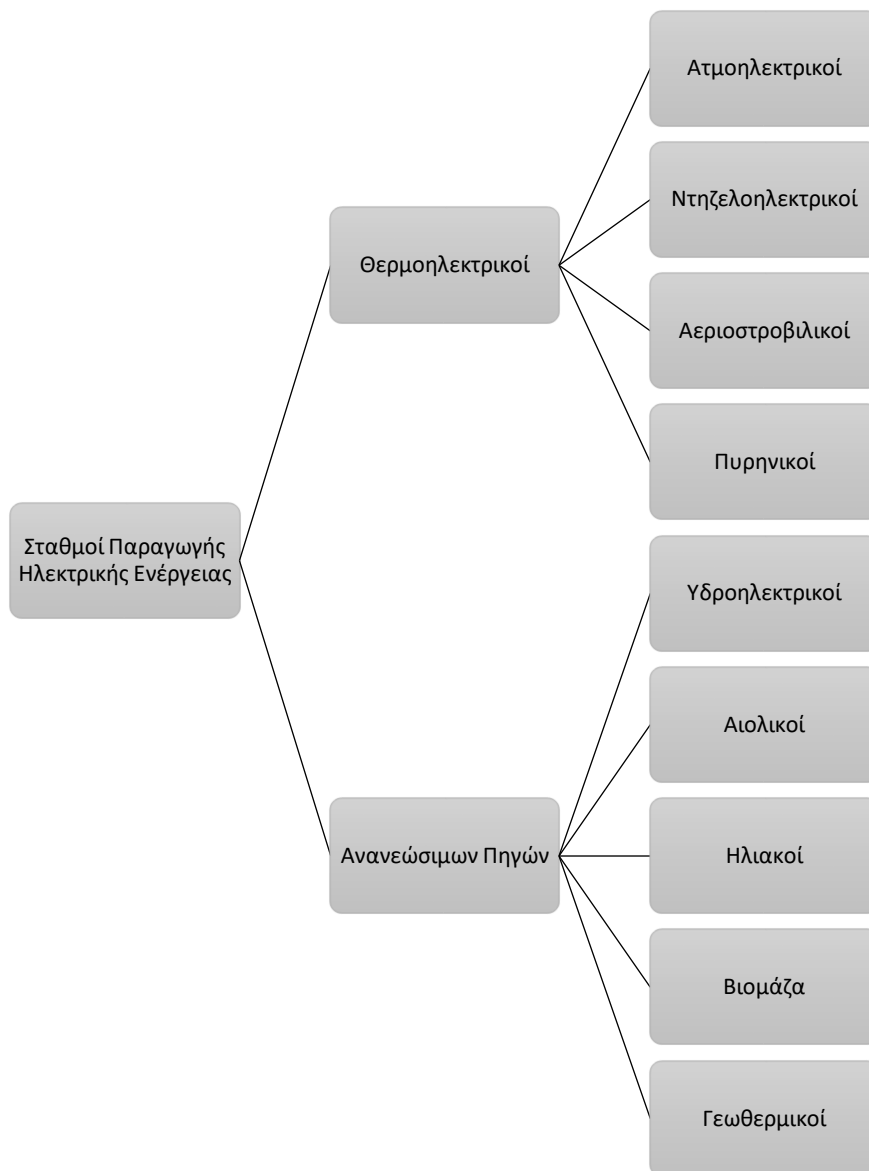
1.2.1 Παραδοσιακό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η δομή του κλασικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας βασίζεται στη διάκριση του σε συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται από διαφορετικά επίπεδα τάσης, ενώ οι μετασχηματιστές παίζουν ζωτικό ρόλο, προσαρμόζοντας την τάση στα αντίστοιχα επίπεδα για κάθε στάδιο του συστήματος. Η διάκριση και τα αντίστοιχα επίπεδα τάσης φαίνονται στην Εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: Βασική Δομή Σ.Η.Ε

Το σύστημα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το τμήμα του Σ.Η.Ε το οποίο είναι υπεύθυνο να φέρει εις πέρας την μετατροπή διάφορων μορφών πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας του ενεργειακού μίγματος που παράγεται παγκοσμίως προέρχεται από σταθμούς που χρησιμοποιούν συμβατικές πηγές και βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί με κριτήριο το είδος των μηχανών τους διακρίνονται σε ατμοηλεκτρικούς, αεριοστροβιλικούς, και νηξελοηλεκτρικούς. Ακόμη, σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι πυρηνικοί οι οποίοι χρησιμοποιούν τη διαδικασία της πυρηνικής σχάσης ουρανίου που βρίσκεται σε αφθονία ως ορυκτό στη φύση για την παραγωγή θερμότητας η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Εναλλακτικές μορφές ενέργειας στρέφονται στην παραγωγή μέσω της αξιοποίησης ανεξάντλητων φυσικών πόρων. Τέτοιου είδους σταθμοί που λειτουργούν με ανανεώσιμους πόρους είναι οι αιολικοί, ηλιακοί, γεωθερμικοί, βιομάζας και οι υδροηλεκτρικοί [5][10]. Η ταξινόμηση των σταθμών παραγωγής γίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Τύποι σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα μεταφοράς αποτελεί τον επόμενο κρίκο, μετά την παραγωγή, στην αλυσίδα εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης διασυνδέονται τα συστήματα παραγωγής με τα συστήματα μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς, είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες, από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης. Οι εναέριες ή σπανιότερα υπόγειες γραμμές μεταφοράς αποτελούν το μέσο πραγματοποίησης αυτής της διαδικασίας. Λεπτομερέστερα, η μεταφορά γίνεται σε συνθήκες υψηλής τάσης για την εξασφάλιση μειωμένων απωλειών [5].

Μέσω του δικτύου διανομής η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους μικρούς οικιακούς καταναλωτές Χ.Τ και σε μεσαίου μεγέθους καταναλωτές Μ.Τ. Η τροφοδοσία των

συστημάτων διανομής Μ.Τ γίνεται από τα συστήματα μεταφοράς μέσω κατάλληλων υποσταθμών Υ.Τ/Μ.Τ. Τα δίκτυα Χ.Τ αναχωρούν από τους υποσταθμούς διανομής Μ.Τ/Χ.Τ και εκτείνονται μέχρι τα φυσικά όρια των καταναλωτών [5].

1.2.2 Το ευφυές δίκτυο

Η έννοια του ευφυούς δικτύου αποτελεί τη δίοδο για την αμεσότερη ανταπόκριση στις αυξανόμενες ανάγκες διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA - International Energy Agency):

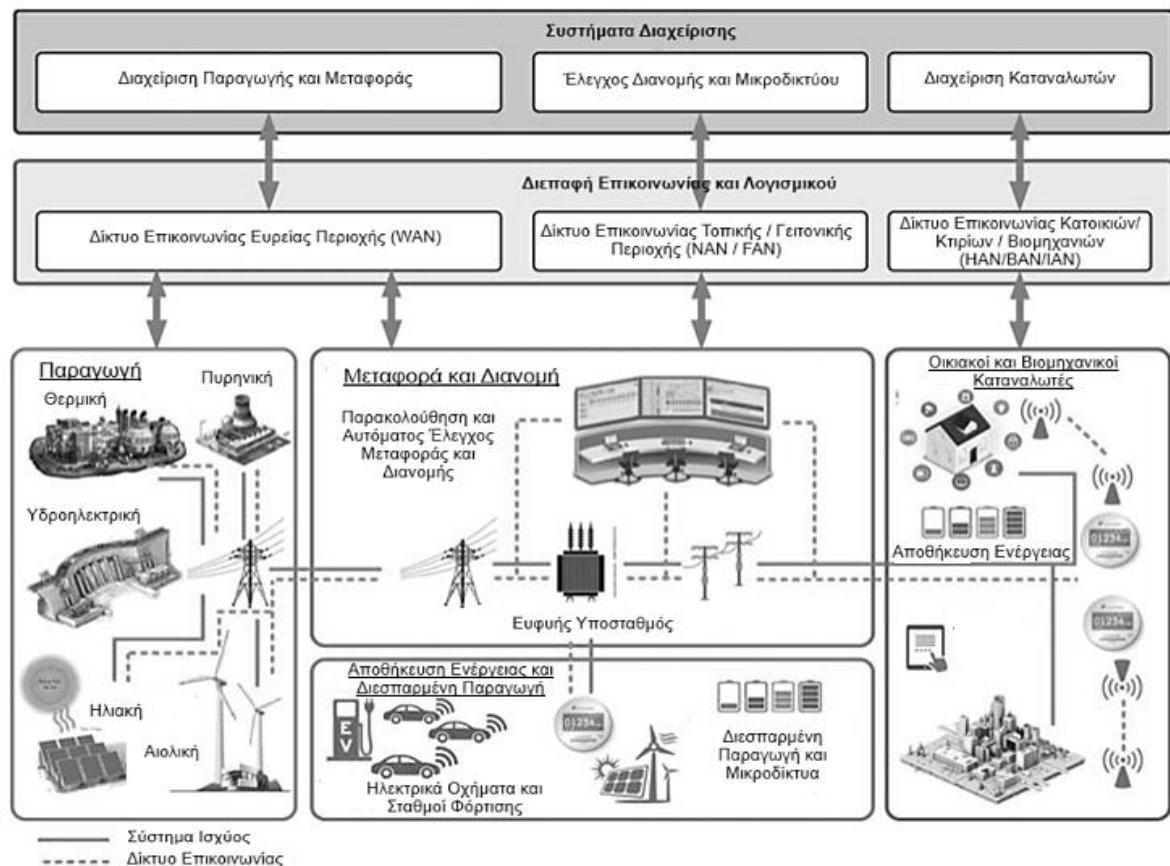
«Τα ευφυή δίκτυα είναι ηλεκτρικά δίκτυα που αξιοποιούν ψηφιακές τεχνολογίες, αισθητήρες και λογισμικό για να βελτιστοποιήσουν την αντιστοίχιση της προσφοράς και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, ελαχιστοποιούν το κόστος και διατηρούν την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου» [7].

Το έξυπνο δίκτυο, λοιπόν, είναι μία προηγμένη υποδομή που χρησιμοποιεί σύγχρονα εργαλεία και τεχνικές για την παρακολούθηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας. Ορισμένα από τα βασικά συστατικά που συγκροτούν το έξυπνο δίκτυο είναι:

1. Έξυπνοι Μετρητές για τη διευκόλυνση στην παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και τον ακριβή υπολογισμό κόστους σε πραγματικό χρόνο.
2. Διεσπαρμένη Παραγωγή για την παραγωγή ισχύος από κατανεμημένες πηγές μικρής κλίμακας κοντά στα σημεία κατανάλωσης.
3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας για την ενίσχυση της βιώσιμης λειτουργία του δικτύου το οποίο χρήζει βελτίωσης λόγω της συνεχούς αυξανόμενης ζήτησης.
4. Σύστημα Αμφίδρομης Επικοινωνίας ανάμεσα σε παραγωγούς και καταναλωτές για την κοστολόγηση και παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας.
5. Αυτόματη Αποκατάσταση Βλαβών για τον ταχύ εντοπισμό των διαταραχών στο δίκτυο, την μεταφορά της πληροφορίας στα κέντρα ελέγχου και τον απομακρυσμένο χειρισμό τους [8].

Η ανάλυση της δομής ενός ευφυούς δικτύου μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το πρίσμα από το οποίο γίνεται η προσέγγιση της. Για την περιγραφή του έξυπνου δικτύου τόσο από την πλευρά παραγωγής ενέργειας όσο και της επικοινωνίας μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ένα πολυεπίπεδο σύστημα με ευρεία ποικιλία τεχνολογιών σε

κάθε ένα από τα επίπεδα αυτά. Η αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου με τις βασικότερες ενσωματώσεις του φαίνεται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Αρχιτεκτονική ευφυούς δικτύου [9]

Στο κατώτερο επίπεδο, οπτικοποιείται το σύστημα ισχύος, του οποίου η λειτουργία συμπεριλαμβάνει τα βασικά σημεία της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας, ενώ έχουν ενσωματωθεί πρόσθετες συνθήκες όπως η διεσπαρμένη παραγωγή, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων κ.α. Στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς περιλαμβάνονται γραμμές και ευφυείς υποσταθμοί των οποίων η διαχείριση γίνεται απομακρυσμένα, καθώς οι έξυπνοι μετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες και διασυνδεδεμένες ηλεκτρονικές συσκευές που παρέχουν ανατροφοδότηση πληροφορίας στα κέντρα παρακολούθησης και ελέγχου. Η κρίσιμη διαφοροποίηση του ευφυούς δικτύου με το παραδοσιακό δίκτυο φανερώνεται άλλωστε, στα συστήματα διαχείρισης και ελέγχου τα οποία επιτυγχάνουν την λειτουργία τους αξιοποιώντας την διεπαφή ICT (Information and Communication Technology), δηλαδή με τεχνολογίες επικοινωνίας και πληροφορικής [9].

Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση δεδομένων και σημάτων ελέγχου που αφορούν το επίπεδο παραγωγής και μεταφοράς πραγματοποιείται με τη βοήθεια δικτύων επικοινωνίας ευρείας περιοχής (WAN), καλύπτοντας την ανάγκη για εμβέλεια σε μεγάλες αποστάσεις. Οι υπηρεσίες ελέγχου διανομής υλοποιούνται μέσω δικτύων τοπικής περιοχής (NAN) και δικτύων γειτονικής περιοχής (FAN). Οι έξυπνοι μετρητές παίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση του έξυπνου δικτύου με την ενσωμάτωσή τους στην υπάρχουσα υποδομή καθώς είναι ικανοί να παρέχουν αμφίδρομη ροή δεδομένων και να έχουν τον χαρακτήρα ελεγκτή. Η μετάδοση δεδομένων μπορεί κυρίως να πραγματοποιηθεί με ασύρματες μεθόδους επικοινωνίας, όπως οι τεχνολογίες που βασίζονται σε Wi-Fi.

Το παραδοσιακό δίκτυο και το έξυπνο δίκτυο μπορούν να διαφοροποιηθούν εάν θεωρήσουμε ότι το πρώτο είναι ηλεκτρομηχανικής φύσεως, ενώ το δεύτερο είναι ψηφιακό και ελεγχόμενο από υπολογιστή. Ο Πίνακας 1.1 αντιπαραθέτει τα βασικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων στα οποία διαφοροποιούνται [9].

Πίνακας 1.1: Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών του συμβατικού και του ευφυούς δικτύου

Συμβατικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας	Ευφυές Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας
Κεντρική Παραγωγή	Διεσπαρμένη παραγωγή
Χειροκίνητη παρακολούθηση και έλεγχος	Αυτόματη παρακολούθηση
Ηλεκτρομηχανική μέτρηση	Ψηφιακή μέτρηση
Μονόδρομη Επικοινωνία	Αμφίδρομη Επικοινωνία
Μονόδρομη Ροή Ισχύος	Αμφίδρομη Ροή Ισχύος
Χειροκίνητη αποκατάσταση βλαβών	Αυτοματοποιημένη αποκατάσταση βλαβών

1.3 Ενεργειακοί Στόχοι

Σημαντικό χρονικό ορόσημο για τη διεθνή κοινότητα, αποτέλεσε ο Σεπτέμβριος του 2015, καθώς για πρώτη φορά τέθηκαν από τα κράτη-μέλη του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών 17 οικουμενικοί στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης. Ανάμεσα σε αυτούς ξεχωρίζει η «Φθινή και καθαρή ενέργεια».

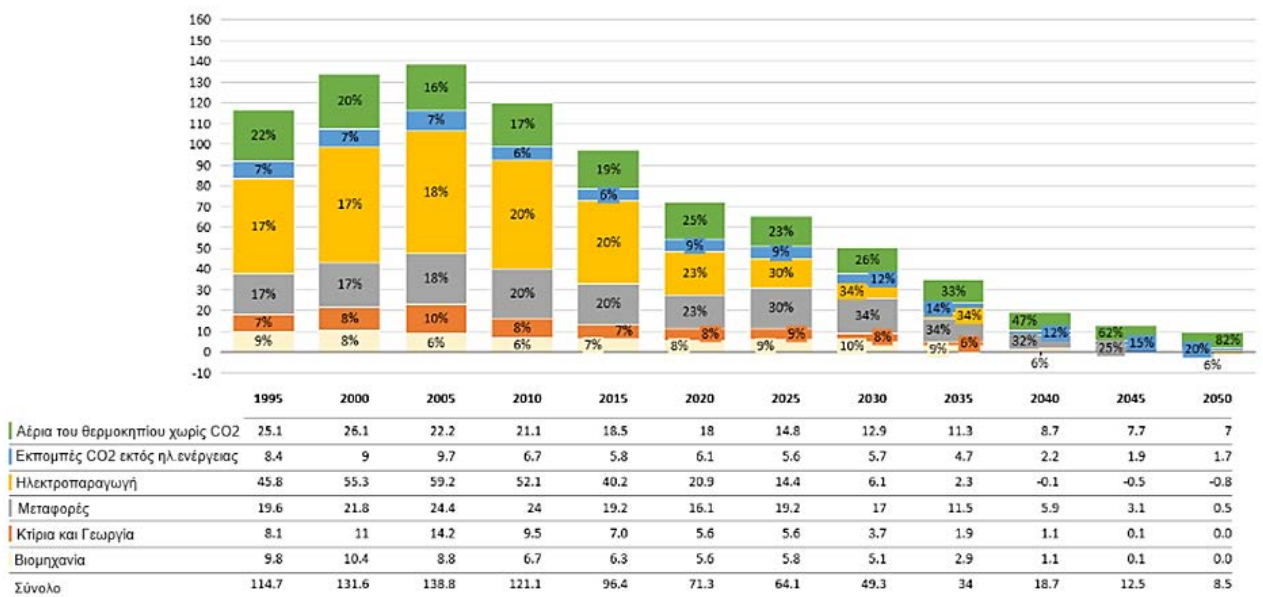
1.3.1 Ευρωπαϊκοί Στόχοι

Ο τομέας της ενέργειας ευθύνεται για περισσότερο από το 75% των αερίων του θερμοκηπίου. Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι 17 στόχοι αποτέλεσαν την πυξίδα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας που δρομολογήθηκε τον Δεκέμβριο του 2019 και αποτελεί ένα φιλόδοξο σχέδιο που αποσκοπεί στην κλιματική ουδετερότητα της Ευρώπης έως το 2050.

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία συγκροτείται από ένα σύνολο πολιτικών στρατηγικών, οι οποίες σχετίζονται με το περιβάλλον, την ενέργεια, τις μεταφορές, τη βιομηχανία και τη γεωργία. Μία εκ των πρωτοβουλιών που έχει αναληφθεί είναι η λεγόμενη Δέσμη «Fit for 55» που μεταφράζει σε νομική υποχρέωση για κάθε κράτος μέλος, την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 με τον δείκτη ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας από τις ΑΠΕ να ανέρχεται σε τουλάχιστον 42.5%. Έτσι, όλες οι χώρες της Ε.Ε έχουν να αντιμετωπίσουν την πρόκληση της μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστά 10%-50%, προσαρμόζοντας τους εθνικούς τους στόχους [10].

1.3.2 Οι εθνικοί ενεργειακοί στόχοι της Ελλάδας

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) είναι ο κατευθυντήριος άξονας της χώρας μας για τη στρατηγική που θα ακολουθηθεί με στόχο την ενεργειακή μετάβαση. Οι εκπομπές κατανέμονται σε διάφορους τομείς που αφορούν αέρια του θερμοκηπίου που δεν περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που δεν σχετίζονται με την καύση ορυκτών καυσίμων για ενέργεια, εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από την ηλεκτροπαραγωγή, εκπομπές που προέρχονται από τις μεταφορές, από κτίρια και γεωργικές δραστηριότητες και από βιομηχανικούς ρύπους. Συγκεκριμένα, η πορεία μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050, όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.2 του ΕΣΕΚ, προσδοκάται να είναι ραγδαία σε κάθε τομέα με στόχο να φτάσουν τα 8,5 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου CO₂ συνολικά [11].



Σχήμα 1.2: Πορεία μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [11]

Ο βασικότερος πυλώνας από αυτούς, που ενισχύει τους αέριους ρύπους είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε να τεθούν στην πράξη οι κατάλληλες ενέργειες καθώς οι άξονες πολιτικής στην ηλεκτροπαραγωγή θα διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο σε αυτή την προσπάθεια.

Ορισμένοι από αυτούς είναι:

1. Σταδιακή μείωση η οποία θα φτάσει σε αποβολή του λιγνίτη από την ενεργειακή παραγωγής μετά το έτος 2028
2. Διείσδυση ΑΠΕ με ποσοστά κάλυψης του 80% της ηλεκτροπαραγωγής
3. Ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων
4. Ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επαρκούς ισχύος και χωρητικότητας [11].

Μία ακόμη προτεραιότητα, για την πορεία της χώρας προς την κλιματική ουδετερότητα είναι η μείωση των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών. Σύμφωνα με τον ΕΣΕΚ, υπάρχουν δύο διαφορετικά περιπτώσεις με συγκεκριμένους ετήσιους ποσοτικούς στόχους μέχρι το 2030. Αυτοί αφορούν τόσο σε αριθμό οχημάτων όσο και σε μερίδιο αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τις συνολικές προβλεπόμενες νέες ταξινομήσεις οχημάτων. Η περίπτωση Α προϋποθέτει την συνέχιση όσων μέτρων πολιτικής και προγραμμάτων επιδότησης υφίστανται μέχρι στιγμής ενώ η περίπτωση Β να τεθούν σε εφαρμογή επιπλέον μέτρα πολιτικής για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης. Στον Πίνακα 1.2 διαφαίνονται όλες οι ποσότητες διείσδυσης Η/Ο στην αγορά που προβλέπονται στην εκάστοτε περίπτωση [11].

Πίνακας 1.2: Προβλεπόμενη ποσότητα διείσδυσης Η/Ο στην αγορά [11]

Περίπτωση	Έτος	Αγορά νέων επιβατικών	Μεταβολή συνολικής αγοράς επιβατικών	Αύξηση συνολικής αγοράς	Επιβατικά BEV - PHEV	Ετήσια Αύξηση	Ποσοστό PEV – PHEV επί ετήσιας αγοράς
Περίπτωση Α: Συνέχιση υφιστάμενων μέτρων πολιτικής	2018	103.431	-	-	314	-	0.30%
	2019	114.109	10.678	10%	480	166	0.42%
	2020	80.977	-33.132	-29%	2.135	1655	2.64%
	2021	100.911	19.934	25%	6.961	4826	6.90%
	2022	105.283	4.372	4%	8.320	1359	7.90%
	2023	130.000	24.717	23%	12.740	4420	9.80%
	2024	136.500	6.500	5%	17.063	4323	12.50%
	2025	143.325	6.825	5%	21.499	4436	15.00%
	2026	150.491	7.166	5%	26.336	4837	17.50%
	2027	158.016	7.525	5%	31.603	5267	20.00%
	2028	165.917	7.901	5%	38.161	6558	23.00%
	2029	174.212	8.296	5%	45.295	7134	26.00%
	2030	182.923	8.711	5%	54.877	9582	30.00%
Περίπτωση Β: Υιοθέτηση αυξημένων μέτρων πολιτικής	2018	103.431	-	-	314	-	0.30%
	2019	114.109	10.678	10%	480	166	0.42%
	2020	80.977	-33.132	-29%	2.135	1655	2.64%
	2021	100.911	19.934	25%	6.961	4826	6.90%
	2022	105.283	4.372	4%	8.320	1359	7.90%
	2023	130.000	24.717	23%	12.740	4420	9.80%
	2024	136.500	6.500	5%	20.475	7735	15.00%
	2025	147.420	10.920	8%	28.010	7535	19.00%
	2026	159.214	11.794	8%	38.211	10201	24.00%
	2027	171.951	12.737	8%	51.585	13374	30.00%
	2028	185.707	13.756	8%	66.854	15269	36.00%
	2029	200.563	14.857	8%	86.242	19388	43.00%

	2030	216.608	16.045	8%		22062	50.00%
--	------	---------	--------	----	--	-------	---------------

Το σχέδιο δράσης το οποίο θα ακολουθηθεί για τον εξηλεκτρισμό των μεταφορών βασίζεται σε κάποιες δράσεις πολιτικής που επηρεάζουν το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας των Η/Ο σε σύγκριση με τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, καθώς και τη διαθεσιμότητα των υποδομών φόρτισης. Συνοπτικά ορισμένα μέτρα πολιτικής με την υψηλότερη προτεραιότητα είναι [12]:

1. Επιδοτήσεις για την προώθηση της αγοράς Η/Ο και κίνητρα για την απόσυρση παλαιών αυτοκινήτων.
2. Χρηματοδότηση για εξηλεκτρισμό υπεραστικών και τουριστικών λεωφορείων.
3. Καθιέρωση ζωνών χαμηλών ρύπων, δηλαδή περιοχών όπου ελέγχεται ή απαγορεύεται η κυκλοφορία ρυπογόνων οχημάτων.
4. Ενίσχυση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μετά την αξιολόγηση των επιπτώσεων και απαιτήσεων της εγκαθίδρυσης των Η/Ο και της ευρείας υιοθέτησης ΑΠΕ στο δίκτυο διανομής.
5. Εφαρμογή Σχεδίων Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων, που αφορούν τη χωροθέτηση δημοσίων σημείων επαναφόρτισης Η/Ο.
6. Εγκατάσταση υποδομών φόρτισης στον αυτοκινητόδρομο.
7. Εγκατάσταση υποδομών φόρτισης σε χώρους εργασίας [12].

1.4 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στην διπλωματική εργασία, ξεκινώντας από μία συνοπτική αναδρομή στο παρελθόν και φτάνοντας έως το σύγχρονο ευφυές δίκτυο και την προσδοκώμενη πορεία της ηλεκτροπαραγωγής και ηλεκτροκίνησης.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στην ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στην ανάλυση ροής φορτίου, την ευστάθεια του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και τις διαδικασίες ρύθμισης συχνότητας και τάσης.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υπογραμμίζοντας την αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια οι οποίες χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μία εισαγωγή στα ηλεκτρικά οχήματα. Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται για την περιγραφή της τεχνολογίας Vehicle to Grid και για την συμβολή της χρήσης της στην ευστάθεια του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί. Γίνεται μία παρουσίαση των δεδομένων καθώς και του τρόπου μοντελοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαδικασίας έξυπνης αμφίδρομης φόρτισης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας τα οποία αξιολογούνται.

Στο Κεφάλαιο 7 αναφέρονται οι λόγοι πρωτοτυπίας της έρευνας, η συμβολή της εργασίας στη διερεύνηση του θέματος, οι δυσκολίες και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με την περάτωση της εργασίας. Τέλος, δίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική επέκταση της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο ορθός σχεδιασμός, η αξιόπιστη λειτουργία και η πρόταση λύσεων για μελλοντική βελτίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από πλευράς του μηχανικού προϋποθέτουν την εκπόνηση μίας σειράς μελετών, όπως μελέτες ροής φορτίου, μελέτες ευστάθειας, μελέτες οικονομικής λειτουργίας και άλλες, που θα τον εφοδιάσουν με τις απαραίτητες πληροφορίες για να φέρει εις πέρας τον αρχικό του στόχο. Αυτές οι μελέτες συγκροτούν ένα σύνολο μελετών το οποίο χαρακτηρίζεται ως «Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας» [6].

2.2 Ανάλυση Ροής Φορτίου

Ο όρος Ανάλυση Ροής Φορτίου αναφέρεται στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, υπό συγκεκριμένη φόρτιση. Στην ουσία, αξιοποιείται για τον προσδιορισμό των τάσεων σε κάθε ζυγό, κατά μέτρο και φασική γωνία, καθώς και των ροών ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε γραμμή μεταφοράς και μετασχηματιστή που απαρτίζουν το δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους λειτουργικούς περιορισμούς. Προηγείται της μελέτης ευστάθειας, καθώς γίνεται εκτίμηση της αρχικής κατάστασης λειτουργίας σε σταθερές συνθήκες παραγωγής και ζήτησης [5].

Κάθε ένας από τους ζυγούς του Σ.Η.Ε εμφανίζει έξι μεγέθη τα οποία αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του προβλήματος ροών φορτίου. Τα μεγέθη αυτά είναι:

V_i : μέτρο τάσης ζυγού [kV]

δ_i : φασική γωνία τάσης ζυγού [μοίρες]

P_{Gi} : παραγόμενη πραγματική ισχύς [MW]

Q_{Gi} : παραγόμενη άεργος ισχύς [MVAR]

P_{Di} : πραγματική ισχύς ζήτησης [MW]

Q_{Di} : άεργη ισχύς ζήτησης [MVAR]

Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να χωριστούν στις κατηγορίες του Πίνακα 2.1:

- A) Μη ελέγξιμες μεταβλητές που περιλαμβάνουν τις μεταβλητές οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν, δηλαδή οι πραγματικές και άεργες καταναλώσεις P_{D_i}, Q_{D_i} .
- B) Μεταβλητές ελέγχου δηλαδή μεταβλητές με δυνατότητα ελέγχου, όπως οι παραγωγές πραγματικής και άεργου ισχύος P_{G_i}, Q_{G_i} .
- Γ) Μεταβλητές Κατάστασης που επηρεάζονται με την μεταβολή των μεταβλητών ελέγχου. Αυτές είναι τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι αντίστοιχες φασικές γωνίες δ_i [5].

Πίνακας 2.1.: Ταξινόμηση μεταβλητών ροής φορτίου

Μη ελέγξιμες μεταβλητές	Μεταβλητές Ελέγχου	Μεταβλητές Κατάστασης
P_{D_i}	P_{G_i}	$ V_i $
Q_{D_i}	Q_{G_i}	δ_i

2.2.1 Ταξινόμηση Ζυγών

Η ταξινόμηση ζυγών αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα στη διαδικασία ανάλυσης ροής φορτίου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ζυγοί είναι τα σημεία σύνδεσης των γεννητριών, των φορτίων και των γραμμών μεταφοράς και η ταξινόμηση τους βοηθά στην κατανόηση της κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

- Ζυγός Παραγωγής / Ελεγχόμενης Τάσης

Η ονομασία των «ζυγών παραγωγής» φανερώνει την θέση τους στην ανάλυση ροής φορτίου. Πρόκειται για τους ζυγούς στους οποίους συνδέονται απευθείας οι γεννήτριες των σταθμών παραγωγής. Στο πρόβλημα ροής φορτίου, για κάθε τέτοιο ζυγό, είναι δυνατόν να προκαθοριστούν δύο ποσότητες, η παραγόμενη πραγματική ισχύς P_{G_i} και το μέτρο τάσης του ζυγού $|V_i|$. Στην πραγματικότητα, η ρύθμιση της μηχανικής ισχύος γίνεται στην είσοδο του στροβίλου της σύγχρονης γεννήτριας μέσω κατάλληλου ρυθμιστή στροφών και ελέγχεται η παραγόμενη πραγματική ισχύς της γεννήτριας. Παράλληλα, επιτυγχάνεται ανεξάρτητα της προηγούμενης και η ρύθμιση του μέτρου της τάσης η οποία πυροδοτείται με την κατάλληλη ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης του τυλίγματος της γεννήτριας. Επομένως, οι τιμές P_{G_i} και $|V_i|$ είναι εκείνες που προκαθορίζονται, ενώ οι Q_{G_i} και δ_i υπολογίζονται [5].

- Ζυγός Αναφοράς / Ταλάντωσης

Στόχος της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διατήρηση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος κάθε χρονική στιγμή και περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sum_{i=1}^n S_{G_i} = \sum_{i=1}^n S_{D_i} + S_{loss} \quad (2.1)$$

Όπου

$$S_{loss} = P_{loss} + jQ_{loss} \quad (2.2)$$

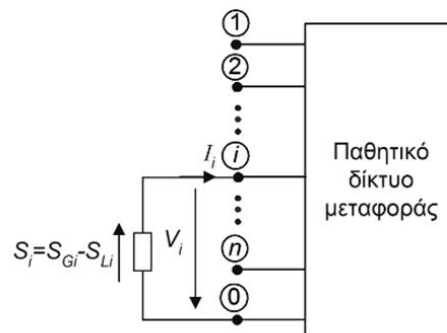
Κάθε χρονική στιγμή, οι τιμές που περιγράφουν τις απώλειες σε πραγματική και άεργο ισχύ (P_{loss}, Q_{loss}) δεν είναι γνωστές. Για αυτό τον λόγο, το αρχικό στάδιο της επίλυσης του ζητήματος ροής φορτίου προϋποθέτει ένας εκ των ζυγών παραγωγής του συστήματος να λάβει τον ρόλο του ζυγού αναφοράς. Για αυτόν, προκαθορίζεται το μέτρο και η γωνία της τάσης συνήθως λαμβάνοντας την τιμή $V_{slack} = 1 \angle 0^\circ$ pu [5].

- Ζυγός Φορτίου

Οποιοσδήποτε ζυγός που ανήκει στο σύστημα δεν είναι άμεσα συνδεδεμένος με σταθμό παραγωγής και διαθέτει φορτία χαρακτηρίζεται ζυγός φορτίου. Δεν υπάρχει παραγωγή, άρα οι τιμές P_{G_i}, Q_{G_i} είναι προκαθορισμένες και μηδενικές. Οι ποσότητες που υπολογίζονται σε αυτούς τους ζυγούς είναι το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης $|V_i|, \delta_i$ [5].

2.2.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

Το τμήμα του δικτύου μπορεί να αναπαρασταθεί ως σύστημα n ακροδεκτών, που αντιστοιχούν στους n ζυγούς, σε καθέναν από τους οποίους γίνεται έγχυση ρεύματος I_i , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Αναπαράσταση δικτύου για εξαγωγή εξισώσεων ροής φορτίου

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά του δικτύου συνοψίζονται στην έκφραση:

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \quad (2.3)$$

Όπου,

I_{bus} : το διάνυσμα $n \times 1$ των ρευμάτων I_i που εισέρχονται στους ζυγούς

V_{bus} : το διάνυσμα $n \times 1$ των τάσεων των ζυγών ($V_i = |V_i| \angle \delta_i$) μετρούμενοι ως προς τον ζυγό αναφοράς

Y_{bus} : ο $n \times n$ πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών ($y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$)

Το ρεύμα I_i που εισέρχεται στον αριθμημένο ζυγό i , μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει των στοιχείων του πίνακα αγωγιμοτήτων και των τάσεων ζυγών ως

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad (2.4)$$

ενώ η ισχύς ως

$$S_i = V_i I_i^* = V_i \left(\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \right)^* \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} S_i^* &= P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n y_{ij} V_i V_j \angle \delta_j - \delta_i + \gamma_{ij} \\ &= \sum_{j=1}^n y_{ij} V_i V_j [\cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) - j \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij})] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ύστερα, από διαδοχικές πράξεις και αντικαταστάσεις ισοδύναμων όρων πολικής μορφής εξάγονται οι εξισώσεις (2.7) και (2.8) οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο πραγματικής και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου. Χαρακτηρίζονται ως στατικές εξισώσεις ροής φορτίου υπό πραγματική μορφή.

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) \quad (2.7)$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} = - \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (2.8)$$

Έτσι, φαινομενικά το πρόβλημα των ροών φορτίου ανάγεται στην επίλυση ενός μη γραμμικού αλγεβρικού συστήματος $2n$ -εξισώσεων με $6n$ -αγνώστους [5][10].

2.2.3 Επαναληπτικές Αριθμητικές Μέθοδοι

Οι εξισώσεις φορτίου που προκύπτουν από την προηγούμενη ανάλυση είναι μη γραμμικές. Έχει αναπτυχθεί πληθώρα τεχνικών για επίλυση μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Δύο εξ' αυτών οι οποίες έχουν αναδειχθεί λόγω της αποτελεσματικότητας τους στην μελέτη ροής φορτίου είναι η μέθοδος Gauss-Seidel και Newton-Raphson. Πρόκειται για διαδικασίες, οι οποίες ξεκινούν με μία αυθαίρετη αρχική εκτίμηση και συνεχίζουν με επαναλαμβανόμενο υπολογισμό ακριβέστερων εκτιμήσεων.

Η επαναληπτική μέθοδος Gauss-Seidel είναι γενικά απλή στην εφαρμογή της. Ωστόσο, η ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος των αλγεβρικών εξισώσεων προς επίλυση. Ακόμη, η αρχική πρόβλεψη είναι καθοριστική για τον αριθμό των επαναλήψεων της μεθόδου και για το εάν η μέθοδος τελικά θα συγκλίνει [10]. Οι αναδρομικές εξισώσεις που επιλύουν το πρόβλημα ανάλυσης φορτίου στην μέθοδο Gauss-Seidel είναι οι εξής:

Για τους ζυγούς φορτίου,

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(v)}} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} V_j^{(v+1)} - \sum_{k=i+1}^n y_{ik} V_k^{(v)} \right] \quad (2.9)$$

Για τους ζυγούς παραγωγής,

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i^{(v+1)}}{V_i^{*(v)}} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} V_j^{(v+1)} - \sum_{k=i+1}^n y_{ik} V_k^{(v)} \right] \quad (2.10)$$

Όπου

$$Q_i^{(v+1)} = -Im \left\{ V_i^{*(v)} \left[\sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} V_j^{(v+1)} + \sum_{k=i+1}^n y_{ik} V_k^{(v)} \right] \right\} \quad (2.11)$$

Η επαναληπτική μέθοδος Newton – Raphson είναι πιο σύνθετη υπολογιστικά αλλά δεν παρουσιάζει προβλήματα σύγκλισης, στην οποία συνήθως καταλήγει ταχύτερα. Η επίλυση συνοψίζεται στην αναδρομική σχέση για τις τάσεις [5] :

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} + \Delta x^{(v)} = x^{(v)} + [J(x^{(v)})]^{-1} \Delta(u)^{(v)} \quad (2.12)$$

Όπου x είναι το διάνυσμα στήλη που περιέχει τις γωνίες και τα μέτρα των τάσεων των ζυγών του συστήματος

$$x = \begin{bmatrix} \delta_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

και $J(x)$ είναι η Ιακωβιανή μήτρα του συστήματος

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{ip}(x)}{\partial \delta_i} & \frac{\partial f_{ip}(x)}{\partial V_i} \\ \frac{\partial f_{iq}(x)}{\partial \delta_i} & \frac{\partial f_{iq}(x)}{\partial V_i} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Όπου,

$$f_{ip} = P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.15)$$

$$f_{iq} = Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.16)$$

$$\Delta(u)^{(v)} = \begin{bmatrix} P_i - f_{ip}(x^{(v)}) \\ Q_i - f_{iq}(x^{(v)}) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

[5][10].

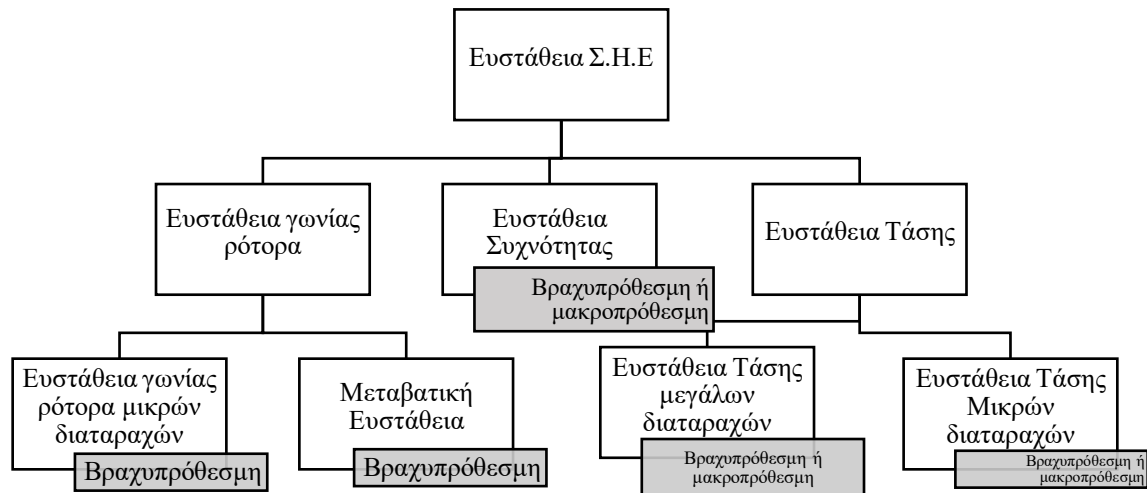
2.3 Ευστάθεια Σ.Η.Ε

Ευστάθεια χαρακτηρίζεται η ικανότητα ενός Σ.Η.Ε να επανέλθει σε μία κατάσταση λειτουργικής ισορροπίας μετά από την υποβολή του σε κάποια διαταραχή. Διαταραχή νοείται κάθε ανεπιθύμητη είσοδος στο σύστημα η οποία προκαλεί την εκτροπή του από την αρχική κατάσταση λειτουργίας. Βραχυκυκλώματα, είσοδος ή έξοδος ενός μεγάλου καταναλωτή, διακοπή γραμμής μεταφοράς, μη αναμενόμενη έξοδος σταθμού παραγωγής σημαντικής ισχύος είναι ορισμένες από τις διαταραχές στις οποίες υπόκειται ένα σύστημα.

Η ευστάθεια μπορεί να διακριθεί σε τρεις ευρείες κατηγορίες:

1. Ευστάθεια γωνίας δρομέα
2. Ευστάθεια Συχνότητας
3. Ευστάθεια Τάσης

Αυτές μπορεί να χαρακτηριστούν ανάλογα με το χρονικό πλαίσιο ενδιαφέροντος που λαμβάνουν χώρα, σε βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη και ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής σε μικρής ή μεγάλης διαταραχής [13]. Η ταξινόμηση φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση Ευστάθειας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.3.1. Ευστάθεια Γωνίας Ρότορα

Βασικότερο κριτήριο για την ευστάθεια γωνίας του ρότορα ενός Σ.Η.Ε είναι η διατήρηση του συγχρονισμού των γεννητριών. Μεταφράζεται ως σταθερή τιμή γωνιακής ταχύτητας εντός επιτρεπτών ορίων και προϋποθέτει την αποκατάσταση της ισορροπίας ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής. Πιο συγκεκριμένα, η παραμονή σε συγχρονισμό σημαίνει ότι όλη η ηλεκτρομαγνητική ροπή των γεννητριών είναι ακριβώς ίση με τη μηχανική ροπή στην αντίθετη κατεύθυνση. Από την άλλη, η περίπτωση της αστάθειας γωνίας, αντικατοπτρίζεται είτε από μία μη αποσβενύμενη ταλαντωτική ή από μία συνεχώς αυξανόμενη συμπεριφορά των στροφών των αξόνων των σύγχρονων γεννητριών. Ο όρος μεταβατική ευστάθεια αφορά την ευστάθεια γωνίας ρότορα όταν το σύστημα επιδέχεται μεγάλες και απότομες διαταραχές [5][13].

2.3.2. Ευστάθεια Συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει σταθερή συχνότητα μετά από μία σοβαρή διαταραχή. Η ευστάθεια συχνότητας συσχετίζεται κατά κύριο λόγο με τις μεταβολές που συμβαίνουν στο μέγεθος της ενεργού

ισχύος. Η αστάθεια της συχνότητας μπορεί να οδηγήσει σε συνεχόμενες διακυμάνσεις της συχνότητας, προκαλώντας την αποσύνδεση των μονάδων παραγωγής ή των φορτίων [13].

2.3.3 Ευστάθεια Τάσης

Η ευστάθεια τάσης αφορά τη διατήρηση της τάσης όλων των ζυγών του συστήματος σε σταθερή τιμή μετά την εμπλοκή της διαταραχής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ευστάθεια τάσης εξαρτάται άμεσα από το ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης αέργου ισχύος στο σύστημα. Η αστάθεια της τάσης στα συστήματα ισχύος είναι συνυφασμένη με λειτουργικά προβλήματα όπως η κατάρρευση της τάσης, η οποία είναι κρίσιμη κατάσταση και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βλάβες στον εξοπλισμό του δικτύου.

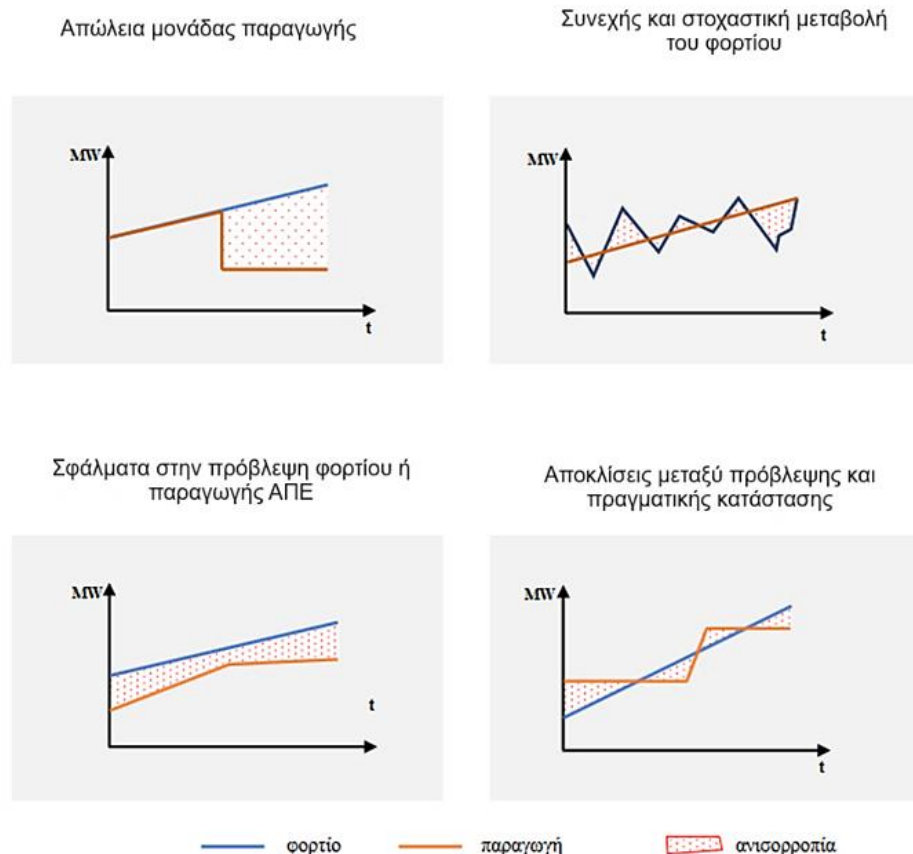
Αν και η ευστάθεια ταξινομείται στις κατηγορίες που αναλύθηκαν, αυτές δεν αποτελούν ανεξάρτητα και μεμονωμένα γεγονότα. Μια κατάρρευση τάσης σε έναν ζυγό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αποκλίσεις στη γωνία του ρότορα και τη συχνότητα. Ομοίως, μεγάλες αποκλίσεις της συχνότητας μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αλλαγές στο μέγεθος της τάσης [13].

2.4 Ρύθμιση συχνότητας και ισοζύγιο ισχύος

Σε κάθε σύστημα ισχύος, η τιμή της συχνότητας πρέπει να παραμένει εντός προκαθορισμένου εύρους διακύμανσης με απώτερο στόχο πάντα την διατήρηση του ισοζυγίου παραγωγής και ζήτησης. Οι δυσλειτουργικές ανισορροπίες του ενεργειακού ισοζυγίου μπορούν να προκληθούν από διάφορους παράγοντες οι οποίοι άλλοτε μπορούν να προβλεφθούν και άλλοτε όχι. Παραδείγματος χάριν,

- 1) Η μείωση παραγωγής ή ζήτησης
- 2) Η συνεχής στοχαστική μεταβολή της ζήτησης
- 3) Η αδυναμία πρόβλεψης του φορτίου κατανάλωσης
- 4) Τα σφάλματα πρόβλεψης παραγωγής από ΑΠΕ

είναι αιτίες αποκλίσεων στο ενεργειακό ισοζύγιο που συναντώνται συχνά και διαφαίνονται στην Εικόνα 2.2 [14].



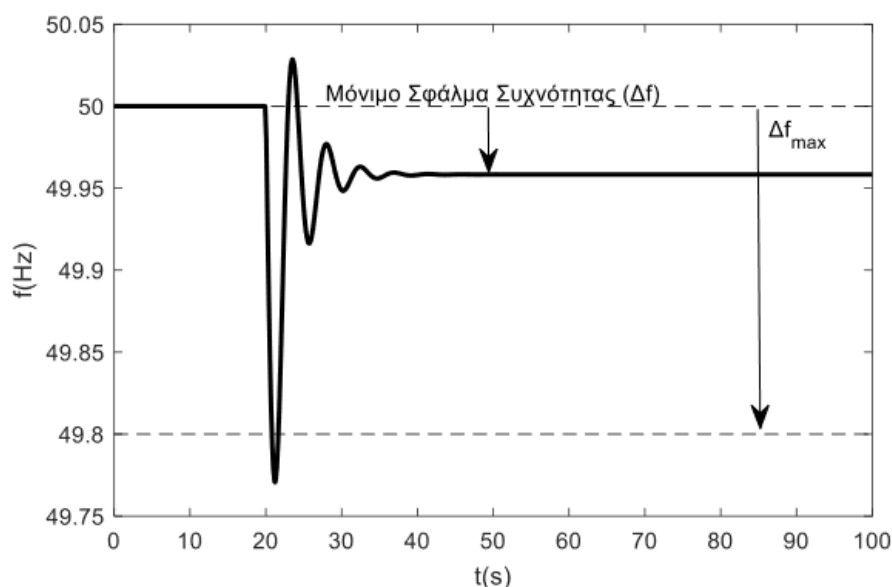
Εικόνα 2.2: Ανισορροπίες του ενεργειακού ισοζυγίου [14]

Το σύνολο των ενεργειών που διενεργούνται για την σταθεροποίηση της συχνότητας σε επιθυμητή τιμή καλείται ρύθμιση συχνότητας και συντελείται σε τρία στάδια:

1. Συγκράτηση και διατήρηση συχνότητας (Πρωτεύουσα Ρύθμιση)
2. Αποκατάσταση συχνότητας (Δευτερεύουσα Ρύθμιση)
3. Αντικατάσταση εφεδρειών (Τριτεύουσα Ρύθμιση)

Η πρώτη διαδικασία που λαμβάνει μέρος ύστερα από την εμφάνιση της ανισορροπίας στο ισοζύγιο ισχύος σχετίζεται με τη διατήρηση της συχνότητας εντός προκαθορισμένου εύρους και συντελείται με την άμεση φυσική αντίδραση των σύγχρονων γεννητριών. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω της αδρανειακής συμπεριφοράς του συστήματος με την ενεργοποίηση και δράση των ρυθμιστών στροφών. Συγκεκριμένα, οι δρομείς των γεννητριών αντιπαρατίθενται ευθύς αμέσως στην διαταραχή αξιοποιώντας την κινητική τους ενέργεια με τρόπο αντίθετο στην μεταβολή. Στη συνέχεια, οι ρυθμιστές στροφών των γεννητριών αντιδρούν μεταβάλλοντας τη μηχανική ισχύ στον άξονα των μηχανών μέχρι την επαναφορά της συχνότητας του συστήματος σε ισορροπία. Βέβαια, το νέο σημείο ισορροπίας της συχνότητας μπορεί να αποκλίνει από την ονομαστική τιμή της. Η

απόκλιση αυτή ονομάζεται μόνιμο σφάλμα συχνότητας (Δf). Η Εικόνα 2.3 απεικονίζει τη συμπεριφορά της συχνότητας κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, με ένδειξη του μόνιμου σφάλματος συχνότητας και της μέγιστης απόκλισης από την ονομαστική τιμή [14].



Εικόνα 2.3: Πρωτεύουσα Ρύθμιση [14]

Η δράση του πρώτου σταδίου ρύθμισης, διαρκεί περίπου 30 δευτερόλεπτα. Σε διασυνδεδεμένα συστήματα, η ανισορροπία ισχύος καλύπτεται και μέσω των διασυνδετικών γραμμών [14].

Το δεύτερο στάδιο, της αποκατάστασης συχνότητας (δευτερεύουσα ρύθμιση), στοχεύει στη διόρθωση του μόνιμου σφάλματος ή των πιθανών αποκλίσεων στις διασυνδετικές ροές από τις προγραμματισμένες τιμές τους. Επιπλέον λειτουργία της ρύθμισης συχνότητας είναι και η ανάκτηση των εφεδρειών που έχουν χρησιμοποιηθεί (τριτεύουσα ρύθμιση), έτσι ώστε οι μονάδες να επανέλθουν σε κατάσταση ικανής συμμετοχής σε επικείμενη διαδικασία διατήρησης της συχνότητας. Η διαδικασία αποκατάστασης συχνότητας ξεκινά μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας διατήρησης συχνότητας και επιτυγχάνεται μέσω δύο διακριτών μηχανισμών:

1. Αυτόματα, με τη βοήθεια του Συστήματος Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής - ΑΡΙΠ (Automatic Generation Control-AGC).
2. Χειροκίνητα, μέσω αποστολής εντολών κατανομής από το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας προς τις Μονάδες Παραγωγής σε πραγματικό χρόνο ή με χειροκίνητη παρέμβαση για αποκατάσταση της συχνότητας [14].

Αυτή η διαδικασία χειροκίνητης αποστολής και εκτέλεσης των εντολών ενεργοποιείται μετά από την Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής σε χρονικό διάστημα λίγων λεπτών. Χειροκίνητες εντολές κατανομής μπορούν επίσης να αποσταλούν σε Μονάδες Παραγωγής που δεν είναι σε λειτουργία, εφόσον έχουν τη δυνατότητα να εκκινήσουν και να ανταποκριθούν εγκαίρως [14].

2.4.1 Ρυθμιστής Στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών είναι ένα σύστημα το οποίο αναπροσαρμόζει την παροχή του καυσίμου για να διατηρήσει σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επομένως, ελέγχει την ταχύτητα της μονάδας προσαρμόζοντας τη ροή ισχύος, ώστε να αλλάξει την ισχύ εξόδου, να αντισταθμίσει τις μεταβολές του φορτίου και έτσι να διατηρήσει τη συχνότητα στην επιθυμητή τιμή. Σήμερα, οι ρυθμιστές στροφών είναι συνήθως ηλεκτρονικά συστήματα που μετρούν τη συχνότητα και ενεργοποιούν υδραυλικές συσκευές για να ελέγξουν τη θέση των βαλβίδων καυσίμου. Υπάρχουν δύο τύποι ρυθμιστών στροφών [15]:

1. Ο ισοχρονικός, δηλαδή σταθερής ταχύτητας ρυθμιστής στροφών, είναι ο απλούστερος. Καταφέρνει να ελέγχει και να συντηρεί τη συχνότητα ανεξάρτητα από το φορτίο ρυθμίζοντας την βαλβίδα καυσίμου. Αυτός ο τύπος ρυθμιστή είναι προβληματικός στη χρήση, όταν πολλές γεννήτριες, είναι συνδεδεμένες για να λειτουργούν παράλληλα αφού πρέπει να μοιράζονται το φορτίο. Οι ισοχρονικοί ρυθμιστές δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Κάθε ρυθμιστής λειτουργεί ανεξάρτητα και προσπαθεί να ρυθμίσει τη γεννήτρια του για να διατηρήσει τη συχνότητα σταθερή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει τις γεννήτριες να λειτουργούν αντίθετα μεταξύ τους, προσπαθώντας να ελέγξουν τη συχνότητα η καθεμία με τις δικές της ρυθμίσεις [15].
2. Ο ρυθμιστής ταχύτητας με στατισμό (speed-droop governor) ελέγχει τη συχνότητα λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο της εκάστοτε γεννήτριας. Επιτρέπει τη συνεργασία όταν δύο ή περισσότερες μονάδες παραγωγής που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να μοιραστούν μια μεταβολή του φορτίου, επιτυγχάνοντας την αποτελεσματική κατανομή του [15].

2.4.2 Στατισμός

Η παράμετρος στατισμού (R) μιας μονάδας είναι μια μη αρνητική τιμή που ορίζεται ως το ποσοστό της αλλαγής συχνότητας που απαιτείται για να μετακινήσει ο ρυθμιστής τη

μονάδα από μηδενικό φορτίο σε πλήρες φορτίο ή το αντίστροφο για την εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης. Υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης στατισμού και η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το μέγεθος στατισμού είναι [15]

$$R = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_n}}$$

R : συντελεστής droop [Hz/MW]

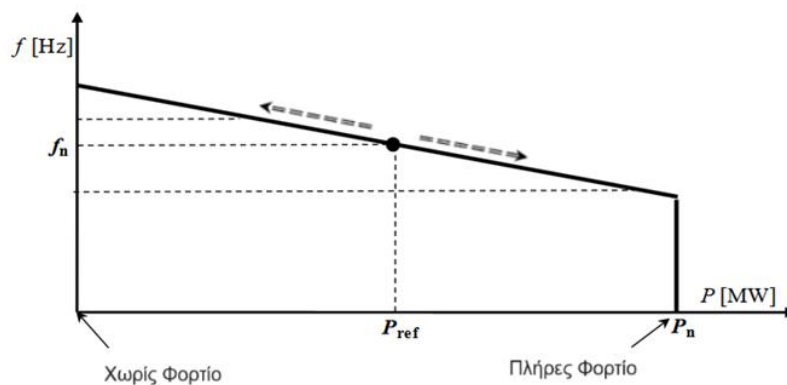
Δf : μεταβολή της συχνότητας [Hz]

f_n : ονομαστική συχνότητα [Hz]

P_n : ονομαστική ισχύς [MW]

ΔP : μεταβολή ισχύος από μηδενικό σε πλήρες φορτίο [MW]

Η χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού (droop) μιας μονάδας παραγωγής είναι στην πραγματικότητα μια χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-συχνότητας και φανερώνεται στην Εικόνα 2.4. Αντικατοπτρίζει μια ιδεατή σχέση μεταξύ της συχνότητας του συστήματος και της ισχύος που μπορεί να παρέχεται από μια μονάδα παραγωγής στο σύστημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Η ισχύς της μονάδας μεταβάλλεται κατά μήκος της χαρακτηριστικής καμπύλης droop στην προσπάθεια να σταθεροποιηθεί η προσφορά και η ζήτηση. Η μείωση της συχνότητας οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγή ισχύος και το αντίστροφο [15].



Εικόνα 2.4: Καμπύλη στατισμού (droop) [15]

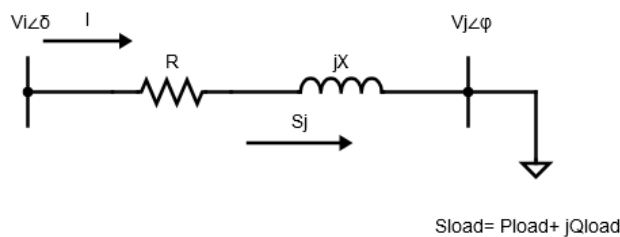
Η ρυθμισμένη τιμή πραγματικής ισχύος (P_{ref}) μιας μονάδας είναι η ισχύς που παρέχεται από τη μονάδα στη ονομαστική συχνότητα (f_n). Η ονομαστική ισχύς P_n της

μονάδας είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από τη μονάδα όταν βρίσκεται στην κατάσταση πλήρους φορτίου [5][15].

2.5 Έλεγχος Άεργης Ισχύος - Τάσης

Η τάση διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθος και τη δομή του συστήματος και διαμορφώνεται ανάλογα με τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Σε αναλογία με την ευστάθεια της συχνότητας, η οποία εκφράζεται σε ενεργειακή ισορροπία πραγματικής ισχύος, η ευστάθεια του μεγέθους τάσης εξασφαλίζει την εξισορρόπηση μεταξύ της παραγόμενης και καταναλισκόμενης άεργης ισχύος [5].

Η ροή της άεργης ισχύος επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τα μέτρα των τάσεων των ζυγών και πολύ λιγότερο από τις μεταβολές των γωνιών τους. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της ροής της άεργης ισχύος, θεωρούνται οι δύο διασυνδεδεμένοι γειτονικοί ζυγοί της Εικόνας 2.5.



Εικόνα 2.5: Μοντέλο διασύνδεσης ζυγών μέσω γραμμής μεταφοράς με αντίσταση και επαγωγική αντίδραση [5]

Το ρεύμα γραμμής ισούται με

$$I = \frac{V_i - V_j}{R + jX} = \frac{V_i - V_j}{Z_{load}} \quad (2.18)$$

Και η τριφασική μιγαδική ισχύς στο τέλος της γραμμής δίνεται από τη σχέση

$$\begin{aligned} S_j &= P_j + jQ_j = 3V_j I^* = 3 \left(\frac{V_j V_i^*}{Z_{load}^*} \right) = 3 \left(\frac{V_j V_i}{Z_{load}} \angle(\varphi - \delta) - \frac{V_j^2}{Z_{load}} \angle\varphi \right) = \\ &= 3 \left(\frac{V_j V_i}{Z_{load}} \cos(\varphi - \delta) - \frac{V_j^2}{Z_{load}} \cos\varphi \right) + j3 \left(\frac{V_j V_i}{Z_{load}} \sin(\varphi - \delta) - \frac{V_j^2}{Z_{load}} \sin\varphi \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

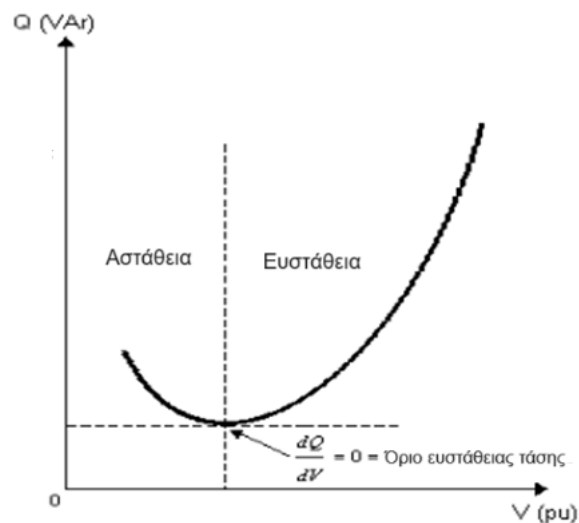
Τελικά, με την παραδοχή ότι $R \ll X$ συμπεραίνονται οι εξισώσεις

$$P_j = \operatorname{Re}\{S_j\} = 3 \frac{V_j V_i}{X} \sin\delta \quad (2.20)$$

$$Q_j = \text{Im}\{S_j\} = 3a \left(\frac{V_j V_i}{X} \cos \delta - \frac{V_j^2}{X} \right) \quad (2.21)$$

Έτσι, το συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι ότι η άεργος ισχύς εξαρτάται από τα μέτρα της τάσης στους ζυγούς [5].

Η επίδραση της έγχυσης ή απορρόφησης αέργου ισχύος στις τάσεις των ζυγών γίνεται περισσότερο αντιληπτή από μία τυπική καμπύλη QV, όπως εκείνη της Εικόνας 2.6, που αναπαριστά τη σχέση των δύο μεγεθών. Το σημείο λειτουργίας για το οποίο συμβαίνει η ελάχιστη απαίτηση αέργου ισχύος, η οποία εκφράζεται με μηδενική παράγωγο $\frac{dQ}{dV}$, διαχωρίζει την καμπύλη σε περιοχές ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας. Το σημείο αυτό δηλαδή, είναι το όριο ευσταθούς λειτουργίας καθώς μια αύξηση στην άεργο ισχύ θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στη δεξιά πλευρά της καμπύλης, το σύστημα θεωρείται ευσταθές. Αντίθετα, τα σημεία λειτουργίας στην αριστερή πλευρά του γραφήματος θεωρούνται ασταθή [16].



Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστική καμπύλη αέργου ισχύος συναρτήσει της τάσης (QV) [16]

2.5.1 Ρυθμιστής Τάσης

Ο έλεγχος του μεγέθους της τάσης στους διάφορους ζυγούς του Σ.Η.Ε που αποσαφηνίζεται με τον έλεγχο της άεργης ισχύος που γίνεται μέσω της ρύθμισης των τάσεων εξόδου των γεννητριών στις μονάδες παραγωγής. Η κατάλληλη μεταβολή του

ρεύματος τυλίγματος διέγερσης με το οποίο είναι εφοδιασμένη η γεννήτρια επιφέρει τον έλεγχο της μαγνητικής ροής της [5].

Η τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης, μπορεί να γίνεται μέσω μίας βοηθητικής διάταξης κατάλληλα προσαρμοσμένης στον άξονα της γεννήτριας, γνωστή ως διεγέρτρια. Η διεγέρτρια μπορεί να είναι μία μικρότερη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που συνδέει το τύλιγμα τυμπάνου της απευθείας με το τύλιγμα διέγερσης της γεννήτριας ισχύος. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνεται μέσω στατών μετατροπών E.P/Σ.P, δηλαδή ανορθωτικών ηλεκτρονικών διατάξεων δομημένων με θυρίστορ, που τροφοδοτούνται απευθείας από την τάση εξόδου της ίδιας της γεννήτριας, και επομένως στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτοδιεγείρεται [5].

Αν και το μέγεθος της τάσης είναι περισσότερο ευαίσθητο στις μεταβολές του φορτίου σε σύγκριση με τη συχνότητα, τα αποδεκτά όρια για την μεταβολή της τάσης είναι μεγαλύτερα. Έτσι, σε αντίθεση με τη συχνότητα δεν απαιτείται δευτερεύουσα ρύθμιση, μιας και τα σφάλματα μετά την αποκατάσταση της συνήθως είναι αποδεκτά [5].

2.6 Όρια Λειτουργίας

Η ορθή λειτουργία ενός Σ.Η.Ε, επιβάλλει τη διαρκή και ομαλή τροφοδότηση των φορτίων κάθε χρονική στιγμή. Παρά τις συνεχείς μεταβολές ζήτησης των φορτίων ορισμένα μεγέθη του δικτύου οφείλουν να τηρούν τα προκαθορισμένα όρια. Επιβάλλεται λοιπόν, ο διαρκής έλεγχος τους με την βοήθεια κατάλληλων ρυθμιστικών διατάξεων ακολουθώντας τις συστάσεις των διαχειριστών του δικτύου [5].

Στην περίπτωση της τάσης, τα επιτρεπόμενα όρια μεταβολής είναι της τάξης 5% της ονομαστικής τιμής. Παράλληλα, τα επιτρεπτά όρια μεταβολής της συχνότητας είναι αρκετά περιορισμένα, καθώς είναι της τάξης 0.05Hz [5].

Κεφάλαιο 3

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η παγκόσμια ανησυχία για την υπερθέρμανση του πλανήτη, τη ρύπανση του περιβάλλοντος και την ενεργειακή κρίση έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για τη στροφή σε ανανεώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας. Η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντικαταστάτες των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής.

3.2 Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος αποτελεί μία δωρεάν διαθέσιμη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω των φωτοβολταϊκών κυψελών. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι κατασκευασμένες από ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο και μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική βασιζόμενες στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με το αυτό, όταν η φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει σε ορισμένα υλικά, απελευθερώνονται ηλεκτρικά φορτία, αρκεί η ενέργεια των φωτονίων να ξεπεράσει μία χαρακτηριστική τιμή στο κάθε υλικό. Η ενέργεια E των φωτονίων δίνεται από τη σχέση [17] :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

Όπου

h : σταθερά του Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$) [Js]

c : ταχύτητα του φωτός [m/s]

λ : μήκος κύματος φωτονίων [nm]

f : συχνότητα φωτονίων [Hz]

Μία φωτοβολταϊκή μονάδα ή πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό κυψελών, οι οποίες συνήθως συνδέονται σε σειρά. Για την μεταφορά της ενέργειας από την φωτοβολταϊκή

διάταξη στο δίκτυο προηγείται η μετατροπή της συνεχούς παραγόμενης ενέργειας σε εναλλασσόμενη με την χρήση αντιστροφέα. Ο ηλιακός αντιστροφέας είναι μία ηλεκτρονική συσκευή και εξασφαλίζει την λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος [17].

3.3 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμία αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς αξιοποιεί την θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο εσωτερικό της γης. Ξεκινώντας από τον φλοιό της γης, ο μέσος ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι 30°C ανά χιλιόμετρο βάθους. Εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας ανά βάθος, εκδηλώνεται μεταφορά θερμικής ενέργειας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια της γης, η οποία ονομάζεται γεωθερμική ενέργεια. Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία, έχουν την γενική δομή των συμβατικών σταθμών μόνο που ο ατμός που κινεί τον στρόβιλο παράγεται από γεωθερμικό ρευστό [17].

3.4 Βιομάζα

Βιομάζα ονομάζεται η ύλη που έχει οργανική προέλευση και παράγεται από μεταβολικές δραστηριότητες ή ως αποσύνθεση των φυτών και ζωικών οργανισμών. Η βιομάζα με κατάλληλες διεργασίες μπορεί να παράγει τα βιοκαύσιμα.

Η βιομάζα μπορεί να προέρχεται από:

- Γεωργικά Υπολείμματα
- Υπολείμματα Ξύλου
- Απόβλητα
- Αυτοφυή φυτά
- Παραπροϊόντα κτηνοτροφίας

Αξιοποιείται με την καύση για την παραγωγή θερμότητας ή με την παραγωγή υγρών και αέριων καυσίμων όπως αιθανόλη, υδρογονάνθρακες, αιθανόλη κ.α. τα οποία μπορούν να τροφοδοτήσουν μηχανές εσωτερικής καύσης ή ατμοστροβίλους και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια [10].

3.5 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Το νερό που βρίσκεται στην Γη έχει την τάση να αλλάζει φυσική κατάσταση η οποία συνδυάζεται με μία αέναη επαναλαμβανόμενη κίνηση. Το νερό που είναι ενσωματωμένο στο υδατικό περιβάλλον εξατμίζεται και αποθηκεύεται στην ατμόσφαιρα με την μορφή

υδρατμών. Αυτοί, υγροποιούνται και απελευθερώνονται ως χιόνια ή βροχή, κατακρημνίζονται και καταλήγουν εν τέλει στην επιφάνεια της Γης, ενώ μέρος τους αποθηκεύεται σε θάλασσες και λίμνες. Η διαδικασία που περιγράφηκε είναι η βασική προσέγγιση για να περιγραφεί ο υδρολογικός κύκλος ή αλλιώς κύκλος του νερού. Λόγω αυτής της ατέρμονης διαδικασίας του υδρολογικού κύκλου, τεκμηριώνεται ότι το υδάτινο δυναμικό αποτελεί πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

3.5.1 Ταξινόμηση Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Ένας Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΥΗΣ) αποτελεί την εγκατάσταση που παράγει ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του νερού και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στους κλασσικότερους τύπους:

1. Υδροηλεκτρικός Σταθμός ταμιευτήρα (Reservoir)
2. Υδροηλεκτρικός Σταθμός ροής ποταμού χωρίς φράγματα (Run-Of-River)
3. Αντλητικός Υδροηλεκτρικός Σταθμός (Pump Storage)

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ροής ποταμού παράγουν ενέργεια από την κίνηση της ροής του νερού. Τυπικά, το νερό εκτρέπεται από την ροή του και μέσω ενός αγωγού πίεσης η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια του δρομέα ενός υδροστροβίλου ο οποίος κινεί μια μηχανικά συζευγμένη γεννήτρια. Η παραγωγή της ενέργειας από τέτοιους σταθμούς δεν συσσωρεύεται και καθορίζεται από την ροή του νερού η οποία εξαρτάται από αστάθμητους παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις προκαλώντας σημαντικές διακυμάνσεις [18].

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός με ταμιευτήρα κατασκευάζεται όταν μεγάλες ποσότητες νερού περιορίζονται από ένα φράγμα το οποίο διακόπτει την ροή των υδατορευμάτων. Η κατασκευή του φράγματος εξασφαλίζει μία περισσότερο σταθερή και συνεχή λειτουργία παραγωγής ενέργειας. Ο σταθμοί παραγωγής συνήθως βρίσκονται πλησίον του φράγματος [18].

Οι αντλητικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί αποτελούν πόρους αποθήκευσης, πράγμα το οποίο συνεπάγεται χρήσιμη συμπεριφορά σε περιπτώσεις ανεπάρκειας υδάτων, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε περιόδους ξηρασίας σε συνδυασμό με αυξημένες απαιτήσεις φορτίου ζήτησης. Η αρχιτεκτονική σχεδιασμού ενός Αντλητικού ΥΗΣ ορίζεται από την ύπαρξη δύο ταμιευτήρων υψηλότερης –σε υψόμετρο- στάθμης και χαμηλότερης στάθμης. Οι αντλητικοί ΥΗΣ παρουσιάζουν διττή φύση καθώς πρώτον παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο σε περιόδους αιχμής φορτίου και δεύτερον καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια έτσι ώστε να αντλήσουν νερό από τον ταμιευτήρα χαμηλότερης προς τον υψηλότερης

στάθμης ταμιευτήρα, με στόχο την αύξηση των υδάτινων αποθεμάτων στον δεύτερο. Η ταμίευση από την άντληση είναι ο μεγαλύτερος τύπος συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που είναι άμεσα διαθέσιμος παγκοσμίως. Ένα Υδροηλεκτρικό Έργο εάν ληφθεί υπόψη η εγκατεστημένη ισχύς χαρακτηρίζεται μεγάλο, μεσαίο ή μικρό βάσει του Πίνακα 3.1 [18].

Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμός Υδροηλεκτρικού έργου με κριτήριο την εγκατεστημένη ισχύ

Χαρακτηρισμός ΥΗΕ	Εγκατεστημένη Ισχύς
Μεγάλο	> 100MW
Μεσαίο	10 MW – 100 MW
Μικρό	< 10 MW

3.5.2 Είδη Τουρμπινών

Οι διατάξεις που είναι υπεύθυνες για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική σε ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο είναι οι τουρμπίνες που εγκαθίστανται. Ο τύπος και ο σχεδιασμός τους μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της ροής του νερού και να επηρεάσει την αποδοτικότητα του σταθμού στο σύνολο της. Το κριτήριο που ταξινομεί τις διαφορετικές τουρμπίνες σε κατηγορίες είναι η αρχή λειτουργίας τους όταν εισάγεται το νερό. Διαχωρίζονται σε:

- Τουρμπίνες δράσης (π.χ. Pelton): λειτουργούν χάρη στην υψηλή ταχύτητα του ρεύματος νερού
- Τουρμπίνες αντίδρασης (π.χ. Kaplan): παράγουν ισχύ αξιοποιώντας την σταθερή μείωση της πίεσης του νερού

Ο σχεδιασμός των στροβίλων Pelton χαρακτηρίζεται από έναν τροχό με μία σειρά από καμπυλοειδής λεπίδες. Το σχήμα τους γίνεται ευκολότερα κατανοητό από την Εικόνα 3.1. Τα ρεύματα του νερού χτυπούν τις λεπίδες, ρέουν κατά μήκος της εσωτερικής καμπύλης και εξέρχονται προς την άλλη κατεύθυνση από αυτή που εισήχθησαν. Η κρούση στις λεπίδες της τουρμπίνας προκαλεί μια ώθηση στις λεπίδες αυτού του στροβίλου, παράγοντας ροπή και την περιστροφή της. Η μέγιστη απόδοση της τουρμπίνας επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα του νερού εκτρέπεται ακριβώς αντίθετα από την κατεύθυνση με την οποία προσπίπτει. Χρησιμοποιείται γενικά σε περιοχές όπου το υψομετρικό δυναμικό είναι μεγαλύτερο από 300 μέτρα [18].



Εικόνα 3.1: Στρόβιλος Pelton [19]

Ο στρόβιλος αντίδρασης Kaplan είναι μια υδροηλεκτρική τουρμπίνα με αυτόματα ρυθμιζόμενες λεπίδες, που προσανατολίζονται βάσει της ροής του νερού. Αυτές οι τουρμπίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υψομετρική διαφορά από 10 έως 70 μέτρα και να παράγουν ισχύ περίπου 5-200 MW. Ένας σταθερός τροχός καθοδήγησης εκτρέπει την διεύθυνση του νερού κατά 90 μοίρες έτσι ώστε να χτυπάει τις ακμές της τουρμπίνας αξονικά. Αυτές οι λεπίδες είναι προσαρμοσμένες ώστε να δίνουν στο νερό τον κατάλληλο βαθμό στροβιλισμού και το νερό θα βγει από την τουρμπίνα αξονικά, διατηρώντας υψηλά τον βαθμό απόδοσης. Ένας τυπικός στρόβιλος Kaplan απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2 [18].



*Εικόνα 3.2: Στρόβιλος Kaplan **Error! Reference source not found.***

3.6 Αιολική Ενέργεια

Ο άνεμος προκύπτει από την κίνηση του αέρα από περιοχές υψηλότερης σε περιοχές χαμηλότερης ατμοσφαιρικής πίεσης, με την ταχύτητα του να αυξάνεται ή να μειώνεται αντίστοιχα. Η διεύθυνση του αέρα επηρεάζεται από μία πληθώρα παραγόντων όπως την άνισα κατανομημένη θέρμανση από τον ήλιο και τη δύναμη Coriolis, μία φαινομενική δύναμη η οποία δημιουργείται λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της και εκτρέπει την ευθεία κίνηση του ανέμου δημιουργώντας κυκλικές φορές κίνησης. Έτσι δημιουργείται ο άνεμος, μία ανεξάντλητη πηγή Ενέργεια [17].

Οι Ανεμογεννήτριες αποτελούν το μέσο αξιοποίησης της φυσικής ροής του ανέμου καθώς την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Σήμερα, η τεχνολογία των ανεμογεννητριών είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα και αποδοτικά μέσα παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές.

3.6.1 Τύποι Ανεμογεννητριών

Η διεύθυνση του άξονα των Α/Γ ταξινομεί τις ανεμογεννήτριες σε δύο βασικούς τύπους, οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Η πλειοψηφία των Α/Γ, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 95%, ανήκουν στην κατηγορία οριζόντιου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine: HAWT) στην οποία ο άξονας περιστροφής των πτερυγίων είναι παράλληλος στη ροή του ανέμου. Μπορούν να διαχωριστούν με περαιτέρω κατηγοριοποίηση σε υπήνεμη ή προσήνεμη διάταξη. Στην υπήνεμη διάταξη, ο ρότορας βρίσκεται στην πλευρά προς την οποία κατευθύνεται ο άνεμος. Όμως, συνήθως χρησιμοποιούνται Α/Γ με προσήνεμη διάταξη, στην οποία ο ρότορας είναι αντιμέτωπος με την ροή του ανέμου. Από την άλλη, ως Α/Γ κατακόρυφου άξονα (Vertical Axis Wind Turbine: VAWT) χαρακτηρίζονται όσων ο ρότορας τοποθετείται κάθετα στο επίπεδο του εδάφους [17].

3.6.2 Υποσυστήματα Ανεμογεννητριών

Η διάταξη των ανεμογεννητριών είναι πολυκλαδική και περιλαμβάνει πολλά υποσυστήματα για την εκτέλεση διακριτών λειτουργιών που έχουν στόχο τη σταδιακή μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και μεταγενέστερα σε ηλεκτρική. Τα υποσυστήματα αναλύονται στο κείμενο που ακολουθεί και οπτικοποιούνται στην Εικόνα 3.3.

Στις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, ο δρομέας συνιστά ένα από τα πιο ζωτικής σημασίας συστήματα σε μία ανεμογεννήτρια καθώς περιλαμβάνει όλα τα εξωτερικά

περιστρεφόμενα μέρη. Αποτελείται από τον μηχανικό άξονα, στο ένα άκρο του οποίου συνδέεται η πλήμνη και στο άλλο άκρο η ηλεκτρογεννήτρια [17].

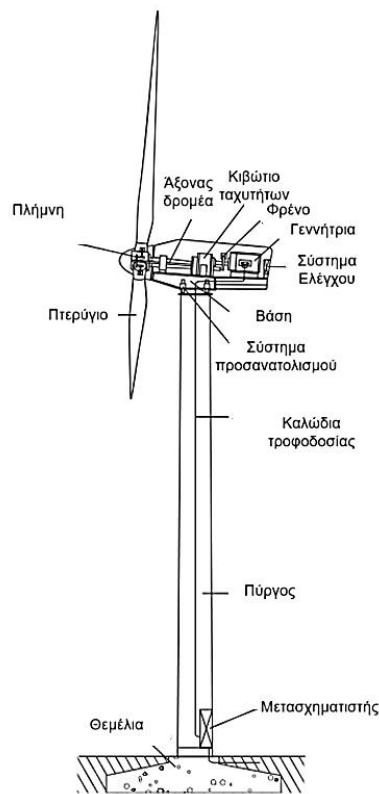
Η γεννήτρια συνδέεται με τον άξονα του δρομέα μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο προσαρμόζει την αργή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (δεκάδες στροφές το λεπτό) στην υψηλότερη της γεννήτριας. Το κιβώτιο ταχυτήτων επικοινωνεί με τη γεννήτρια μέσω ενός άξονα και ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής [17].

Στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας τοποθετείται υποχρεωτικά το μηχανικό φρένο, το οποίο σχεδιάζεται έτσι ώστε να ακινητοποιεί το περιστρεφόμενο μέρος όταν η Α/Γ είναι εκτός λειτουργίας [17].

Η πλήμνη είναι το σημείο στήριξης των πτερυγίων, τα οποία είναι είτε σταθερά ή έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονα τους. Συνηθέστερα, ο αριθμός των πτερυγίων είναι τρία διότι κατορθώνεται καλύτερη μηχανική και αεροδυναμική συμπεριφορά παράλληλα με την τήρηση του κόστους κατασκευής σε λογικά πλαίσια [17].

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης και η ηλεκτρογεννήτρια προστατεύονται από ένα περίβλημα, την άτρακτο. Η άτρακτος βρίσκεται πάνω στον πύργο και στηρίζει ολόκληρη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση [17].

Ο πύργος αναλαμβάνει να ανταπεξέλθει στο μηχανικό φορτίο της Α/Γ και γι' αυτόν το λόγο η αντοχή στην κατασκευή του είναι καθοριστικό χαρακτηριστικό. Πρόκειται για μία στιβαρή κατασκευή η οποία σηκώνει το βάρος της Α/Γ ενώ απορροφά τις πιθανές δονήσεις και δυνάμεις που προκαλούνται από τις διάφορες συνθήκες καιρού και ανέμου [17].



Εικόνα 3.3: Υποσυστήματα Α/Γ [20]

3.6.3 Ηλεκτρογεννήτριες

Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιούν κατά κόρον τριφασικές σύγχρονες μηχανές. Το μαγνητικό πεδίο στις σύγχρονες μηχανές παράγεται από το δρομέα, είτε μέσω τυλίγματος που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, ή από μόνιμους μαγνήτες. Οι σύγχρονες μηχανές παράγουν άεργο και ενεργό ισχύ ενώ οι επαγωγικές επειδή δεν διαθέτουν διέγερση στον δρομέα, καταναλώνουν άεργο ισχύ για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου [17].

Στη συνέχεια, γίνεται μία συνοπτική ανάλυση των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ και είναι χρήσιμη για τη βέλτιστη μελέτη και κατανόηση τους.

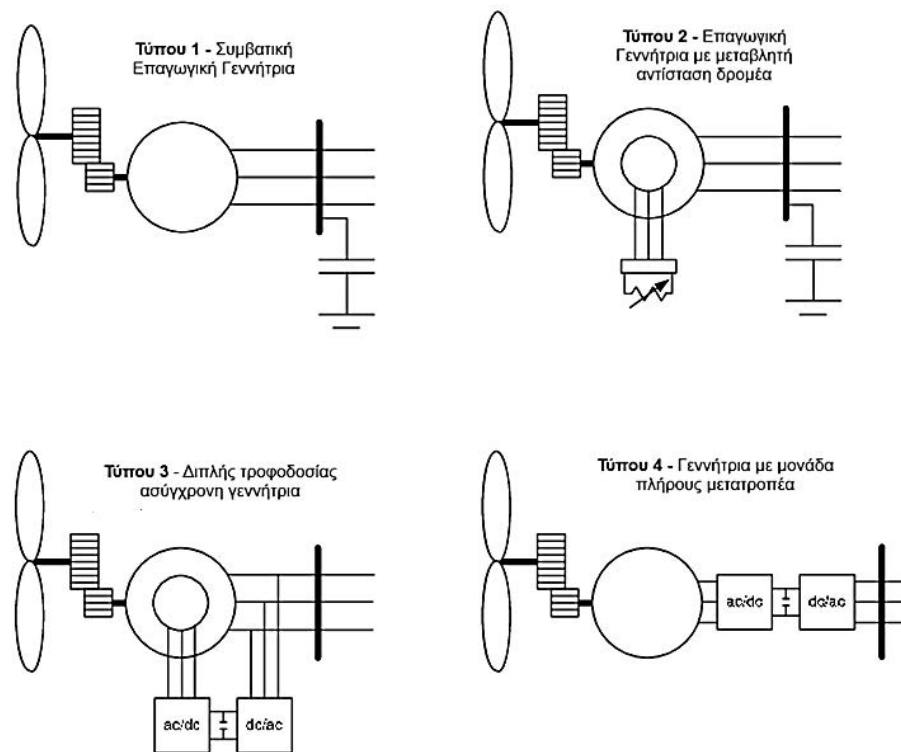
- **Επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού:** Ο δρομέας τους δεν συνδέεται ηλεκτρικά με κάποια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Τα ρεύματα στον δρομέα επάγονται από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο στάτης. Ο δρομέας τους αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, που προσαρμόζονται στον άξονα της μηχανής. Η επιφάνεια του δρομέα φέρει οδοντώσεις που σχηματίζουν αυλάκια και καθορίζουν τη σχέση της ροπής – ταχύτητας. Στις αυλακώσεις τοποθετούνται

ράβδοι και σχηματίζουν το τύλιγμα κλωβού του δρομέα, τα ρεύματα του οποίου επάγονται από τον στάτη [17].

- **Επαγωγικές μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα:** Ονομάζονται "δακτυλιοφόρου δρομέα" γιατί ο δρομέας τους διαθέτει δακτυλίους στον άξονά του. Ο δρομέας τους φέρει αυλακώσεις εντός των οποίων τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του αστέρα καταλήγουν σε τρεις δακτυλίους που βρίσκονται στον άξονα του δρομέα. Μέσω των δακτυλίων επιτρέπεται η σύνδεση του τυλίγματος του δρομέα με ρυθμιστικές αντιστάσεις ή μια ελεγχόμενη τριφασική πηγή τάσης. Και πάλι, το τύλιγμα του στάτη είναι εκείνο που επάγει ρεύματα στον δρομέα [17].
- **Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη:** Το μαγνητικό πεδίο παράγεται στο δρομέα της μηχανής από μόνιμους μαγνήτες. Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των μαγνητών, διακρίνονται σε επιφανειακών και εσωτερικών μαγνητών. Ανάλογα με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα διακρίνονται σε ακτινικής και αξονικής ροής. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη εμφανίζουν αυξημένο κόστος και οι ιδιότητες των μαγνητών επηρεάζονται σημαντικά από την αύξηση της θερμοκρασίας, η απαγωγή της οποίας είναι δύσκολη και γι' αυτό απαιτείται διαρκής έλεγχος στο εσωτερικό της [17].

Ο στάτης όλων των μηχανών Ε.Ρ έχει κυλινδρική δομή που είναι κατασκευασμένη από μεταλλικά ελάσματα που φέρουν αυλακώσεις στις οποίες εισάγεται το τριφασικό τύλιγμα του στάτη. Η αρχή λειτουργίας των μηχανών Ε.Ρ. στηρίζεται στην αναπτυσσόμενη ροπή από την περιστροφή των τριφασικών κινητήρων, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει το μαγνητικό πεδίο του δρομέα με εκείνο του στάτη [17]. Οι Α/Γ μπορούν να διαχωριστούν λοιπόν σε τέσσερις κυρίαρχους τύπους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4:

- Α. Σταθερών στροφών με επαγωγική γεννήτρια (Τύπου 1)
- Β. Μεταβλητών στροφών Α/Γ με επαγωγική γεννήτρια και μεταβλητή αντίσταση δρομέα (Τύπου 2)
- Γ. Μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας, ελεγχόμενη από μετατροπέα (Τύπου 3)
- Δ. Μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Τύπου 4) [21][22][23]



Εικόνα 3.4: Τύποι Ανεμογεννητριών

- **A/Γ σταθερής ταχύτητας:** Οι A/Γ σταθερής ταχύτητας διαθέτουν ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού και μέσω της απευθείας σύνδεσης με μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι ασύγχρονες γεννήτριες δεν διαθέτουν ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου ταχύτητας και η ταχύτητα τους παραμένει σταθερή. Παράγουν πραγματική ισχύ όταν ο άξονας της τουρμπίνας περιστρέφεται ταχύτερα από τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, δημιουργώντας αρνητική ολίσθηση. Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του δρομέα n_m από τη σύγχρονη n_s ονομάζεται ολίσθηση (slip) [17].

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

Όπως κάθε επαγωγική γεννήτρια, έτσι και αυτή που είναι ενσωματωμένη στις A/Γ τύπου 1 απορροφά άεργο ισχύ. Πολλές εξ' αυτών χρησιμοποιούν πυκνωτές για να πετύχουν μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην έξοδο της A/Γ. Οι ανεμογεννήτριες τύπου 1 προσαρμόζουν τη γωνία των περυγίων ώστε να επιτρέπουν στη γεννήτρια να λειτουργεί με σταθερή μηχανική ταχύτητα, ακόμη και όταν η ένταση του ανέμου ποικίλλει [21][22][23].

-Α/Γ μεταβλητών στροφών με επαγωγική γεννήτρια και μεταβλητή αντίσταση δρομέα: Οι Α/Γ του συγκεκριμένου τύπου αποτελείται από μια ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα, ο οποίος δρομέας συνδέεται με αντίσταση μέσω ενός μετατροπέα. Ο μετατροπέας είναι αρμόδιος να ρυθμίζει την ποσότητα της ισχύος που καταναλώνεται στην αντίσταση. Η αντίσταση επηρεάζει την ολίσθηση της γεννήτρια και έτσι, λειτουργεί με μεταβλητές ταχύτητες. Επομένως, η ποσότητα της ισχύος που καταναλώνεται από την αντίσταση συνεπάγεται τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου που τροφοδοτεί το δίκτυο. Εάν απαιτείται λιγότερη ισχύς από το δίκτυο, περισσότερη ισχύς καταναλώνεται στην αντίσταση. Με αυτόν τον τρόπο ρύθμισης, μπορεί να διατηρηθεί σταθερή ισχύς ακόμα και κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου, που μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική απόκριση της μηχανής και την εισαγωγή διαταραχών στο δίκτυο [21][22][23].

- Μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας, ελεγχόμενη από μετατροπέα: Αποτελείται από μία ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα και δύο μετατροπείς που επιτρέπουν την ρύθμιση τάσης τόσο στο κύκλωμα του ρότορα όσο και στο δίκτυο. Ονομάζονται μετατροπέας ρότορα και μετατροπέας γραμμής αντίστοιχα. Ανάλογα με την απαιτούμενη ενέργεια, η ροή της ισχύος μέσω των μετατροπέων μπορεί να είναι από το δίκτυο προς τον ρότορα ή το αντίστροφο. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να έχει ευέλικτη λειτουργία ακόμη κι όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλή. Με αυτόν τον τρόπο, το εύρος παραγωγής της τουρμπίνας είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των δύο προηγούμενων τύπων. Εκτός από την πραγματική ισχύ που φτάνει στο δίκτυο από το κύκλωμα στάτη της γεννήτριας, ισχύς παραδίδεται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο όταν η γεννήτρια κινείται ταχύτερα από την σύγχρονη ταχύτητα. Όταν η γεννήτρια κινείται πιο αργά από την σύγχρονη ταχύτητα, η πραγματική ισχύς ρέει από το δίκτυο, μέσω και των δύο μετατροπέων, και από τον δρομέα προς τον στάτη. Αυτές οι δύο λειτουργίες, που καθίστανται δυνατές επιτρέπουν ένα πολύ ευρύτερο φάσμα ταχυτήτων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της είναι ότι προσφέρει τα οφέλη του ελέγχου της πραγματικής και άεργης ισχύος, μιας παραδοσιακής σύγχρονης γεννήτριας, ενώ μπορεί να λειτουργεί ασύγχρονα [21][22][23].

- Μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη
Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται σε αυτόν τον τύπο είναι συνήθως μια σύγχρονη γεννήτρια με μόνιμο μαγνήτη. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι μεταβλητή, η συχνότητα της παραγόμενης ισχύος είναι επίσης μεταβλητή. Δεν δύναται να συνδεθεί απευθείας με το δίκτυο σταθερής συχνότητας. Γι' αυτό παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας

μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου έτσι ώστε να μετατρέπει την μεταβλητής συχνότητας της γεννήτριας σε σταθερή συχνότητα στο δίκτυο. Ο μετατροπέας του συστήματος καλείται «πλήρης μετατροπέας» επειδή διαχειρίζεται καθολικά την ισχύ της τουρμπίνας [21][22][23].

3.7 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών

Οι ανανεώσιμες πηγές προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, αλλά η διαλείπουσα παραγωγή τους ενδυναμώνει τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ενσωμάτωση τους στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα.

Με την εντατική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο επιβεβλημένη η ανάγκη εφαρμογής συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται είτε άμεσα, δηλαδή με την αποθήκευση ως ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί, ή έμμεσα, με διαδικασίες όπου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας και στη συνέχεια μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια όταν χρειάζεται. Παρακάτω αναφέρονται τα συνηθέστερα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται:

- **Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο** είναι μία μηχανική διάταξη αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας την σε κινητική μέσω μίας περιστρεφόμενης μάζας, του σφονδύλου. Μία πηγή εισάγει ενέργεια και αποθηκεύεται όσο ο σφόνδυλος επιταχύνει και επιβραδύνει όταν το σύστημα αποφορτίζει [24].
- **Οι αντλητικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί** είναι ο μοναδικός τρόπος αποθήκευσης σε μεγάλες ποσότητες με ταυτόχρονη διατήρηση υψηλής απόδοσης και οικονομίας. Στο σημερινό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κυριαρχούν καθώς κατέχουν το 98% της συνολικής αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως [24].
- Ένα **σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπαταρίας** βασίζει την λειτουργία του στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που συμβαίνει στις διασυνδεδεμένες κυψέλες που συγκροτούν το σύστημα. Κάθε κυψέλη αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο ανόδου, ένα καθόδου και έναν ηλεκτρολύτη. Κατά την αποφόρτιση, ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο, ενώ κατά τη διάρκεια της φόρτισης, συμβαίνουν οι αντίστροφες αντιδράσεις [24].

- **Αποθήκευση Ενέργειας με Υδρογόνο και Μεθανιοποίηση:** Η τεχνολογία ηλεκτρόλυσης του νερού διασπά το νερό στα συστατικά του μέρη, το υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία αποθηκεύονται. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να καταναλωθεί ως καύσιμο, και έτσι η ενέργεια να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική για το δίκτυο [24].
- **Η αποθήκευση ενέργειας με υπεραγώγιμα μαγνητικά πεδία** είναι μια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιεί υπεραγωγούς για να αποθηκεύσει ενέργεια σε ένα μαγνητικό πεδίο. Όταν ο υπεραγωγός ψύχεται κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας, έχει αμελητέα αντίσταση, επομένως το ρεύμα συνεχίζει να ρέει. Η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το ρεύμα στο υπεραγώγιμο πηνίο. Μπορεί να απελευθερωθεί με την αποφόρτιση του πηνίου [24].
- Οι **υπερπυκνωτές** χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια με μεγαλύτερη επιφάνεια και λεπτότερα διηλεκτρικά υλικά για να επιτύχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες από τους συμβατικούς πυκνωτές. Όταν εφαρμόζεται τάση σε έναν πυκνωτή, αντίθετα φορτία συσσωρεύονται στις επιφάνειες κάθε ηλεκτροδίου με ενδιάμεσο διηλεκτρικό υλικό, δημιουργώντας έτσι ένα ηλεκτρικό πεδίο που επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας [24].

Κεφάλαιο 4

Ηλεκτροκίνηση

4.1 Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Οχήματα

Τυπικά, η βασική αρχιτεκτονική ενός Η/Ο αποτελείται από τρία μέρη:

1. Πηγή Ενέργειας (Μπαταρία)
2. Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος (Ελεγκτής)
3. Ηλεκτροκινητήρας

Η μπαταρία είναι εκείνη που λειτουργεί ως αποθηκευτικό μέσο ενέργειας για το ηλεκτρικό όχημα και παρέχει την απαραίτητη ισχύ στον ηλεκτροκινητήρα. Προηγείται βέβαια, η ρύθμιση και ο έλεγχος από τον μετατροπέα ισχύος. Ο ελεγκτής λαμβάνει το σήμα όταν ο οδηγός πιέζει το πεντάλ του γκαζιού και την προσαρμόζει κατάλληλα ανάλογα με την θέση του. Η ισχύς που μεταφέρεται περιστρέφει τον ηλεκτροκινητήρα και θέτει σε κίνηση τους τροχούς του οχήματος και κατά συνέπεια το ίδιο το όχημα. Έτσι, ο ηλεκτροκινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική η οποία κινεί το όχημα [25].

4.2 Μπαταρία

Η μπαταρία παίζει κρίσιμο ρόλο στην απόδοση και στην αυτονομία των οχημάτων. Η αυτονομία του οχήματος, δηλαδή η απόσταση που μπορεί να διανύσει εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την χωρητικότητα της μπαταρίας. Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι:

- Μπαταρίες βασισμένες σε μόλυβδο
- Μπαταρίες βασισμένες σε νικέλιο
- Μπαταρίες βασισμένες σε λιθίο

Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως (Lead-Acid), οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd), οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH) και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) [25].

4.2.1 Μπαταρίες μολύβδου – οξέως (Lead-Acid)

Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέως (Lead-Acid) αποτελούν κλασσική επιλογή μπαταρίας που ενσωματώνεται σε συστήματα ανάφλεξης για εκκίνηση της διαδικασίας καύσης του καυσίμου σε οχήματα. Όσον αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα, αποτελούν μία οικονομικά συμφέρουσα επιλογή ενώ η κατασκευή της χαρακτηρίζεται από μεγάλη αντοχή. Ωστόσο, μειονεκτεί σημαντικά σε σύγκριση με άλλα είδη μπαταρίας εξαιτίας του βάρους της και των λιγότερων κύκλων ζωής, οι οποίοι είναι καθοριστικοί παράγοντες για τις επιδόσεις του οχήματος [25].

4.2.2 Μπαταρία Νικελίου - Υδριδίου του Μετάλλου (Ni-MH)

Οι μπαταρίες νικελίου – Υδριδίου του Μετάλλου μπορούν να θεωρηθούν ως μία βελτιωμένη προέκταση των Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd). Διαφοροποιούνται στην ιδιότητα των κυψελών του υδριδίου του μετάλλου να θερμαίνονται καθώς η αντίδραση της φόρτισης είναι εξώθερμη και εκλύεται θερμότητα. Στην περίπτωση της κυψέλης Νικελίου-Καδμίου η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη. Ακόμη, οι Ni-MH εκδηλώνουν ευαίσθητη συμπεριφορά σε υπερφορτίσεις και εκφορτίζονται με μεγαλύτερο ρυθμό [25].

4.2.3 Μπαταρία Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd)

Πρόκειται για μπαταρίες με σχετικά μεγάλη ανθεκτικότητα στον χρόνο. Επίσης, έχει την ικανότητα να διατηρεί την αξιόπιστη λειτουργία του ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Κρίνονται κατάλληλες για την χρήση τους σε ηλεκτρικά οχήματα, αποδίδοντας σε ικανοποιητικό βαθμό την χωρητικότητα τους σε υψηλές απαιτήσεις εκφόρτισης. Τέλος, το κάδμιο αποτελεί ένα ιδιαίτερα τοξικό βαρύ μέταλλο το οποίο πρέπει να διαχειρίζεται ορθά κατά την απόρριψη του [25].

4.2.4 Μπαταρία ιόντων λιθίου (Li- Ion)

Η μπαταρία ιόντων λιθίου διαθέτει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα συγκριτικά με τις προαναφερθείσες, καθιστώντας την βέλτιστη επαναφορτιζόμενη επιλογή για τα ηλεκτρικά οχήματα. Βέβαια, η πολυπλοκότητα του συστήματος είναι αυξημένη εξαιτίας των πρόσθετων ενσωματωμένων κυκλωμάτων προστασίας και αυτό συνεπάγεται υψηλό κόστος κατασκευής [25].

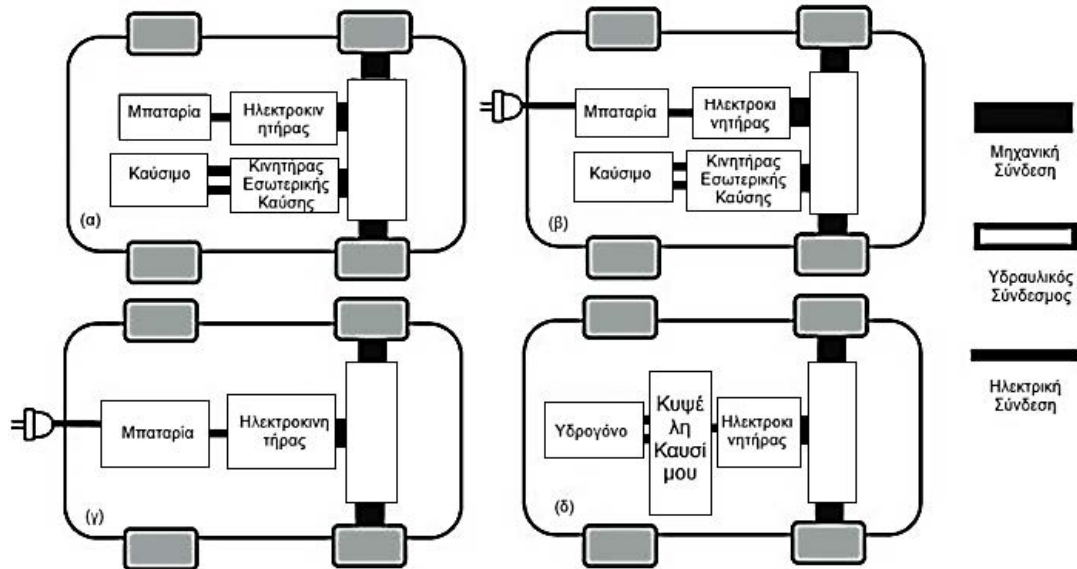
4.3 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται κατά βάση λαμβάνοντας υπόψη τον μετατροπέα ενέργειας, την πηγή ενέργειας και την εξωτερική πηγή φόρτισης που χρησιμοποιεί. Κατηγοριοποιούνται, κατά κύριο λόγο σε:

1. Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (HEVs): Στην προκειμένη περίπτωση η τεχνολογία του αυτοκινήτου απαιτεί την συνεργασία της μπαταρίας και του ηλεκτροκινητήρα με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ανάλογα με την προτίμηση οδηγικής δραστηριότητας και την ανάπτυξη της επιθυμητής ταχύτητας, η επιλογή της κίνησης από το ηλεκτρικό σύστημα ή από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης εναλλάσσεται. Ο συνδυασμός αυτών των δύο δύναται να φέρει βελτιωμένη απόδοση, αλλά όπως είναι λογικό και υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και καυσίμου. Η μπαταρία των υβριδικών οχημάτων μπορεί να φορτιστεί μέσω της αναγεννητικής πέδησης, δηλαδή κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης ή του φρεναρίσματος, και από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης [26].
2. Ηλεκτρικά Οχήματα Μπαταρίας (BEVs): Πρόκειται για ηλεκτρικά οχήματα τα οποία διαθέτουν μπαταρία και ηλεκτροκινητήρα. Τα Η/Ο της συγκεκριμένης ομάδας χρησιμοποιούν για την κίνηση τους την αποθηκευμένη ενέργεια αποκλειστικά από την μπαταρία τους, που φορτίζεται από εξωτερική πηγή, φορτιστές στο δίκτυο διανομής ή μέσω αναγεννητικής πέδησης. Τα Η/Ο μπαταρίας είναι εξοπλισμένα με σύστημα μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο για τον κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος [26].
3. Όχημα με Υβριδικό Ηλεκτρικό Κινητήρα και δυνατότητα Φόρτισης (PHEV): Τα οχήματα PHEV παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία στον τρόπο φόρτισης της μπαταρίας καθώς αυτή μπορεί να φορτιστεί και από φορτιστή που τροφοδοτείται από το δίκτυο διανομής. Διαθέτουν μεγαλύτερη ισχύ ηλεκτροκινητήρα, μικρότερο κινητήρα εσωτερικής καύσης και μεγαλύτερη χωρητικότητα μπαταρίας. Μπορούν να επιτύχουν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εάν λειτουργήσουν μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα [26].
4. Όχημα με κυψέλη καυσίμου (FCEV): Τα οχήματα FCEV αντικαθιστούν την μπαταρία με κυψέλη καυσίμου που εφοδιάζεται με υδρογόνο που μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια για την εκκίνηση του ηλεκτροκινητήρα. Μπορεί επίσης

εναλλακτικά, να λειτουργεί με συνδυασμό μπαταρίας και υπερπυκνωτών [26].

Η Εικόνα 4.1 απεικονίζει τα τέσσερα βασικά είδη ηλεκτρικών οχημάτων δίνοντας έμφαση στην εσωτερική αρχιτεκτονική στην οποία βασίζουν την λειτουργία τους.



Εικόνα 4.1: (α) Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (HEVs), (β) Όχημα με Υβριδικό Ηλεκτρικό Κινητήρα και δυνατότητα Φόρτισης (PHEV), (γ) Ηλεκτρικό Όχημα Μπαταρίας (BEV), (δ) Όχημα με κυψέλη καυσίμου (FCEV) [26]

4.4 Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να είναι μονής ή αμφίδρομης κατεύθυνσης. Η τεχνολογία φόρτισης μονής κατεύθυνσης επιτρέπει την ροή ενέργειας αποκλειστικά από το δίκτυο προς το όχημα. Η τεχνολογία της αμφίδρομης φόρτισης έρχεται να προσθέσει σε εκείνη της μονής κατεύθυνσης, την μεταφορά ενέργειας από τα οχήματα προς το δίκτυο. Επίσης μπορεί να είναι συμβατική και μη ελεγχόμενη από εξωτερικούς παράγοντες ή να είναι ελεγχόμενη και να ρυθμίζεται δυναμικά, με βάση τις απαιτήσεις του δικτύου και την τιμή της ενέργειας.

Στην μη ελεγχόμενη φόρτιση μονής κατεύθυνσης, της οποίας η ροή ισχύος επεξηγείται στην Εικόνα 4.2, το όχημα μόνο φορτίζεται με ισχύ που προέρχεται από το δίκτυο. Η διαδικασία ξεκινά αυτοβούλως όταν το όχημα συνδεθεί στον φορτιστή και σταματά όταν είναι πλήρως φορτισμένο. Η διαδικασία ελέγχεται αποκλειστικά από το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας και του φορτιστή [27].



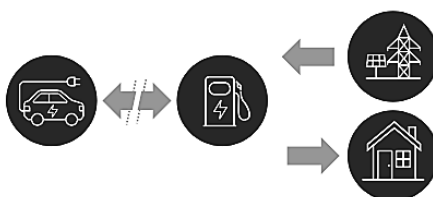
Εικόνα 4.2: Μη ελεγχόμενη φόρτιση μονής κατεύθυνσης [27]

Η έξυπνη φόρτιση μονής κατεύθυνσης (V1G), ελέγχεται έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του δικτύου και η φόρτιση να διανεμηθεί σε χρονικές περιόδους οι οποίες περιορίζουν τις αιχμές για το σύστημα ή τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας κατοικίας. Η Εικόνα 4.3 παρουσιάζει τη ροή ισχύος στην έξυπνη φόρτιση μονής κατεύθυνσης και το «διασπασμένο» βέλος αναπαριστά τη δυνατότητα ελέγχου [27].



Εικόνα 4.3: Έξυπνη φόρτιση μονής κατεύθυνσης [27]

Η διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση (V2H – V2B) ευθυγραμμίζεται με τις εντολές από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας για να χρησιμοποιεί τα ηλεκτρικά οχήματα ως πηγή εφεδρικής ισχύος τοπικά. Οι τεχνολογίες V2H (Vehicle to Home) και V2B (Vehicle to Building) αφορούν την ενίσχυση του τοπικού φορτίου κατοικίας ή εμπορικού κτιρίου αντίστοιχα. Μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του οικοδομήματος σε περιπτώσεις όπως η διακοπή ρεύματος, ωστόσο η ενέργεια δεν μεταφέρεται στο δίκτυο. Η Εικόνα 4.4 αναπαριστά τη ροή ισχύος και τον έλεγχο στη διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση [27].



Εικόνα 4.4: Διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση [27]

Η Διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση με ροή ενέργειας απευθείας στο δίκτυο (V2G) διαχειρίζεται από ένα πιο εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, παρέχοντας ενεργειακή προμήθεια και επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο και επιτρέποντας στους καταναλωτές να έχουν κέρδος. Η Εικόνα 4.5 αναπαριστά τη ροή ισχύος και τον έλεγχο στη διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση με ροή ισχύος στο δίκτυο [27].

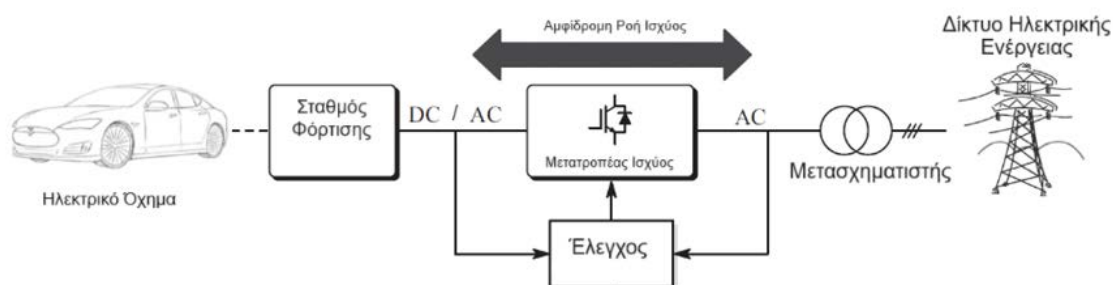


Εικόνα 4.5: Διπλής κατεύθυνσης έξυπνη φόρτιση με ροή ενέργειας απευθείας στο δίκτυο [27]

4.5 Vehicle to Grid (V2G)

Η τεχνολογία V2G προτάθηκε από τους Kempton και Letendre το 1997. Αναφέρεται στην ικανότητα των Η/Ο να λειτουργούν ως διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής και να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Σε περιπτώσεις παρουσίας πλεονάζουσας ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο, τα Η/Ο φορτίζονται (G2V), ενώ όταν υπάρχει έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας και η κατανάλωση είναι υψηλότερη από την παραγωγή, επιστρέφουν την ενέργεια στο δίκτυο (V2G). Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπεται η χρήση των Η/Ο ως κινητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας πέρα από την απλή χρήση τους ως μέσο μεταφοράς [28].

Το ηλεκτρικό όχημα, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4.6, διασυνδέεται με έναν σταθμό φόρτισης, ο οποίος με την σειρά του μέσω ενός μετατροπέα ισχύος, ακολουθούμενος από έναν μετασχηματιστή επικοινωνεί με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μία μονάδα ελέγχου και παρακολούθησης κρίνεται αναγκαία για τον καθορισμό των αμφίπλευρων εξόδων του μετατροπέα. Η ανάγκη για συντονισμό της λειτουργίας ανέδειξε την ανάγκη για ένταξη διαφόρων μεθόδων και προτύπων επικοινωνίας [28].



Εικόνα 4.6: Αρχή λειτουργίας τεχνολογίας V2G [28]

Για τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων που συμμετέχουν στην V2G λειτουργία προϋποτίθεται η ύπαρξη προτύπων, δηλαδή τεχνικών προδιαγραφών που λειτουργούν σαν

συμφωνίες και αναπτύσσονται σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο. Για να λειτουργήσει η έξυπνη φόρτιση, οι διάφοροι παράγοντες εντός του συστήματος της ηλεκτροκινητικότητας πρέπει να μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με την τιμολόγηση, τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαθεσιμότητα των σταθμών φόρτισης Η/Ο. Τα τεχνικά πρότυπα οργανώνουν αυτήν την επικοινωνία.

Το βασικό πρότυπο που επιτρέπει μια πιο εξελιγμένη επικοινωνία μεταξύ του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και του σταθμού φόρτισης είναι το ISO 15118. Το πρότυπο βελτιώνει την εμπειρία φόρτισης για τους οδηγούς, καθιστώντας την πιο φιλική προς το δίκτυο και ασφαλέστερη. Το πρότυπο επιτρέπει στο σύστημα να διαπραγματεύεται τη μεταφορά ενέργειας χωρίς να διακόπτει τη φόρτιση. Αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται με την πάροδο του χρόνου μπορεί να προσαρμοστεί αξιόπιστα ως απάντηση σε συγκεκριμένα γεγονότα κατά τη διάρκεια της συνεδρίας φόρτισης. Τέλος, το ISO 15118 βελτιώνει επίσης τον τρόπο ενσωμάτωσης των πληροφοριών κόστους στο πλαίσιο φόρτισης, επιτρέποντας στον χρήστη να προγραμματίσει τη φόρτιση με βάση την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας [29].

Για να επιτραπεί η ανάπτυξη του V2G, τα ενεργειακά συστήματα θα χρειαστεί να αποκτήσουν επιπλέον ικανότητες και να εξελιχθούν σημαντικά για να υποστηρίξουν τη διπλής κατεύθυνσης ροή ενέργειας και το υψηλό επίπεδο ελέγχου σε ένα ολοένα και πιο κατανεμημένο σύστημα. Τα δίκτυα, λοιπόν, θα πρέπει να συνεχίσουν να εξελίσσονται σε «έξυπνα δίκτυα» καθώς αυτά διαθέτουν την απαραίτητη υποδομή για να καλύψουν αυτές τις ανάγκες. Ένα από τα κρίσιμότερα στοιχεία των ευφών δικτύων τα οποία θα αξιοποιηθούν κατάλληλα είναι οι έξυπνοι μετρητές. Με την παρακολούθηση της κατανάλωσης και της παραγωγής ενέργειας, θα επιτρέπεται η εφαρμογή προηγμένων τιμολογιακών πολιτικών πραγματικού χρόνου [27].

4.6 Επίπεδα Φόρτισης

Το περιβάλλον φόρτισης καθορίζεται από τον τόπο εγκατάστασης του σταθμού φόρτισης που μπορεί να είναι μία ιδιωτική κατοικία, μία δομή εργασίας ή κάποιος δημόσιος σταθμός φόρτισης. Ο σταθμός φόρτισης Η/Ο μπορεί να παρέχει είτε εναλλασσόμενο ή συνεχές ρεύμα στο όχημα και σε κάθε περίπτωση υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι λειτουργικές καταστάσεις της φόρτισης, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Συνήθη Επίπεδα Φόρτισης

Επίπεδο 1- AC	120 Volt, μονοφασικό, μέγιστο ρεύμα 16A, μέγιστη ισχύς 1.9kW
Επίπεδο 2 –AC	240 Volt, μονοφασικό, μέγιστο ρεύμα 80A, μέγιστη ισχύς 19.2 kW
Επίπεδο 3 – DC	200-600 Volt, μέγιστο ρεύμα 400A, μέγιστη ισχύς 300kW

Το Επίπεδο Φόρτισης AC 1 είναι το βασικότερο και συνηθέστερο σε πρόσβαση επίπεδο φόρτισης. Δεν προσφέρει ιδιαίτερα γρήγορη φόρτιση καθώς ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης των 1.9kW απαιτεί γύρω στις 10 ώρες για να φορτίσει πλήρως μια μπαταρία ενός τυπικού Η/Ο. Ορισμένοι προμηθευτές Η/Ο μάλιστα, προτείνουν ότι η φόρτιση επιπέδου 1 πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε ασυνήθιστες περιπτώσεις όταν το επίπεδο 2 δεν είναι διαθέσιμο. Ομοίως, η δυνατότητα αποφόρτισης των 1.9 kW δεν είναι ικανοποιητική καθώς θα μπορούσε να καλύψει μόνο τις ανάγκες έκτακτης εφεδρείας ενός μικρού σπιτιού, χωρίς μεγάλες ηλεκτρικές συσκευές [30].

Το Επίπεδο Φόρτισης AC 2 χρησιμοποιεί μονοφασικό ρεύμα με τυπικές τάσεις που κυμαίνονται από 220 έως 240 V. Η υψηλότερη τάση διευκολύνει τη ταχύτερη φόρτιση με τη μέγιστη δυνατότητα παροχής ισχύος να φτάνει έως 19.2 kW. Η φόρτιση AC Επιπέδου 2 έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τον ανεφοδιασμό των οχημάτων κατά τη διάρκεια που το όχημα είναι σταθμευμένο σε προορισμούς όπως εργασιακοί χώροι, εμπορικά κέντρα ή οικιακά γκαράζ. Η φόρτιση AC Επιπέδου 2 αναμένεται να είναι η προτιμώμενη μέθοδος για τις δυνατότητες V2G, λόγω της συμβατότητας της με εφαρμογές που επιτρέπουν στους χρήστες να ελέγχουν τη φόρτιση [30].

Η φόρτιση DC Επιπέδου 3, ή αλλιώς γρήγορη φόρτιση DC μπορεί να προσφέρει επαναφόρτιση στο 80% μέσα σε 10 με 15 λεπτά. Η γρήγορη φόρτιση DC συνήθως χρησιμοποιεί έναν εξωτερικό φορτιστή για να πραγματοποιήσει τη μετατροπή από AC σε DC. Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας του οχήματος ελέγχει τον εξωτερικό φορτιστή για να παρέχει DC απευθείας στη μπαταρία [30].

4.7 Συμμετέχοντες στην τεχνολογία V2G

Η καινοτομία η οποία βρίσκεται πίσω από την V2G τεχνολογία παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον για οποιονδήποτε εμπλεκόμενο φορέα σχετίζεται με αυτήν. Κάθε ένας από

αυτούς τους φορείς αναλαμβάνει διαφορετικό ρόλο ξεκινώντας από την πλευρά της μπαταρίας και φτάνοντας μέχρι και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και απολαμβάνει διαφορετικά οφέλη αλλά και προκλήσεις.

Οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας πάντοτε επιθυμούν να εξασφαλίζουν αξιόπιστη παροχή ενέργειας στους πελάτες τους και παράλληλα την οικονομική τους βιωσιμότητα και κερδοφορία. Προφανώς, ένα από τα εμπόδια στην ταχύτερη υιοθέτηση των ΑΠΕ είναι έλλειψη οικονομικών αποδοτικών λύσεων αποθήκευσης ενέργειας. Η χρήση των Η/Ο ως αποθήκευση ενέργειας μπορεί να μειώσει την ανάγκη για συμβατικές πηγές ενέργειας επιταχύνοντας και την ενσωμάτωση των ΑΠΕ. Αν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, και αν ένας επαρκής αριθμός Η/Ο με δυνατότητα λειτουργίας V2G ήταν συνδεδεμένος στο δίκτυο τις σωστές ώρες, θα άλλαζε την κατάσταση δραματικά. Επίσης, η παροχή ισχύος σε ώρες αιχμής αποτελεί μια δαπανηρή υποχρέωση για τις εταιρείες ενέργειας. Αν οι μπαταρίες των οχημάτων ηλεκτρικής αποθήκευσης ενέργειας μπορούσαν να εκφορτιστούν επιλεκτικά για να αποκόψουν την αιχμή φορτίου, ο πάροχος θα μπορούσε ίσως να αποφύγει την ανάγκη να εκκινήσει το εργοστάσιο παραγωγής, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας [30].

Ένας ενεργειακός φορέας συγκέντρωσης (aggregator) πρέπει να συνδυάσει τις μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων και άλλες διανεμημένες ενεργειακές πηγές, όπως ηλιακή ενέργεια και οικιακές μπαταρίες, σε εικονικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας (VPP). Ως εικονικός σταθμός παραγωγής ενέργειας νοείται δηλαδή, ένα σύστημα το οποίο συνδυάζει πολλούς μικρούς παραγωγούς και τους διαχειρίζεται ως μία ενιαία μονάδα παραγωγής ενέργειας, δίνοντας τη ψευδαίσθηση ενός μεγάλου σταθμού παραγωγής. Βέβαια, δεν έχει καθοριστεί εάν τον ρόλο του συγκεντρωτή V2G θα καλύψει ένας νέος ή ένας ήδη υπάρχων φορέας. Αυτή η υπηρεσία συγκέντρωσης θα μπορούσε να παρέχεται από διάφορους φορείς, όπως οι διαχειριστές συστημάτων διανομής, οι εταιρείες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ή άλλες εταιρείες λογισμικού τρίτων. Τυπικά, μία μπαταρία ενός μονάχα οχήματος έχει ελάχιστη επίδραση στο σύστημα. Η πραγματική αξία για το ενεργειακό σύστημα θα αναδειχθεί σε συγκεντρωτικό επίπεδο, όπου εκατοντάδες, χιλιάδες ή ακόμα και εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συντονιστούν για να συμμετέχουν στις λειτουργίες του δικτύου και στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος του συγκεντρωτή είναι να διαχειρίζεται αυτές τις πολλαπλές μπαταρίες. Είναι υπεύθυνος για ενσωματώνει τους διαθέσιμους συμμετέχοντες, να μεταβιβάζει σήματα ελέγχου και να ορίζει τις

διαδικασίες πληρωμής και αγοράς υπηρεσιών. Είναι αυτός που θέτει τη στρατηγική ελέγχου, το χρονικό πλαίσιο και το επίπεδο της τελικής κατάστασης φόρτισης [30].

Ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος γίνεται συγχρόνως καταναλωτής και πωλητής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ιδιοκτήτης μπορεί να είναι σε θέση να επωφεληθεί από την διπλή ροή της ισχύος, πουλώντας πίσω στο δίκτυο την ενέργεια. Ιδιαίτερα, για όσους φορτίζουν το όχημα τους για παράδειγμα τη νύχτα με χαμηλότερο κόστος, μπορούν να έχουν κέρδος. Πέρα από τα πιθανά οφέλη υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις με τις οποίες έρχεται αντιμέτωπος ο ιδιοκτήτης του οχήματος. Επειδή ο βασικός σκοπός του οχήματος είναι η χρήση του για ανάγκες μετακίνησης, ο ιδιοκτήτης δεν πρέπει να βρεθεί σε θέση με ανεπαρκή επίπεδα φόρτισης όταν επιθυμεί να το χρησιμοποιήσει. Επομένως, μέσω διαφόρων στρατηγικών ελέγχου λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία εκφόρτισης η επιθυμητή τελική κατάσταση της μπαταρίας για να καλύπτονται οι ανάγκες του ιδιοκτήτη. Προβληματισμό, έχει επίσης προκαλέσει η επίπτωση που μπορεί να έχει η συχνή φόρτιση στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας του οχήματος [30].

Ο κατασκευαστής της μπαταρίας στοχεύει στην κατασκευή που θα εξασφαλίζει τέτοια απόδοση ώστε να υπάρχει αυξημένη αυτονομία και διάρκεια ζωής. Επομένως, δραστηριότητες που μπορούν να βλάψουν αυτά τα χαρακτηριστικά βρίσκουν αντίθετους τους κατασκευαστές. Η χρήση της μπαταρίας για επικουρικές υπηρεσίες όπως η ρύθμιση συχνότητας έχει μικρότερη επίδραση στη μπαταρία σε σύγκριση με την κάλυψη φορτίων αιχμής. Επομένως, σε κάθε περίπτωση η κατασκευή όσων μπαταριών προβλέπονται για λειτουργίες V2G πρέπει να πληρούν τις απαιτούμενες κατασκευαστικές προδιαγραφές [30].

4.8 Οφέλη αμφίδρομης φόρτισης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Εκτιμάται ότι τα Η/Ο παραμένουν σταθμευμένα για περίπου 97% της ημέρας, χρόνος ο οποίος εάν αξιοποιηθεί η ενέργεια της μπαταρίας μπορεί να αποβεί καθοριστικός παράγοντας για το ηλεκτρικό σύστημα. Η τεχνολογία V2G μπορεί να αποφέρει πληθώρα προτερημάτων για το δίκτυο:

- **Έλεγχος πραγματικής ισχύος – Ρύθμιση Συχνότητας:** Τα Η/Ο εκτελούν ρόλο εφεδρείας, ανταποκρινόμενα ταχύτατα σε πιθανή απώλεια παραγωγής. Έτσι, μπορούν να συμβάλλουν στην εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης, απορροφώντας ή εγχέοντας πραγματική ισχύ και ρυθμίζοντας τη συχνότητα του δικτύου.

- **Εξομάλυνση αιχμής φορτίου:** Κατά τη διάρκεια της αιχμής φορτίου, είναι περισσότερο οικονομικά συμφέρουσα η χρήση ενέργειας αποθηκευμένης στα Η/Ο παρά η λειτουργία των παραδοσιακών μονάδων παραγωγής. Έτσι, αποφεύγεται και η επιβάρυνση των εξαρτημάτων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα ακόμη μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι οι ιδιοκτήτες των Η/Ο ανταμείβονται με οικονομικά οφέλη.
- **Αποθήκευση Ενέργειας από ΑΠΕ:** Ο στόχος είναι εξισορροπηθεί η παραγωγή και η κατανάλωση μέσω της φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών των Η/Ο. Η υπερβάλλουσα ενέργεια αποθηκεύεται στα Η/Ο από τις ΑΠΕ και χρησιμοποιείται όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Έτσι, διευκολύνεται η ενσωμάτωση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο.
- **Έλεγχος Αέργου Ισχύος – Ρύθμιση Τάσης:** Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος παρέχει ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο. Η διατήρηση της τάσης εντός φυσιολογικών τιμών σε επίπεδο διανομής, είναι μια πρόκληση, ειδικά για μακρινές γραμμές τροφοδοσίας που μπορεί να απαιτήσει συσκευές ρύθμισης τάσης. Με τη V2G, αποφεύγονται οι διακυμάνσεις τάσης. Επίσης, βοηθά στην βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, μειώνοντας τις απώλειες ισχύος και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητά του.
- **Μειωμένη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα:** Η τεχνολογία V2G μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποθηκεύσει την ενέργεια μέσω ηλιακής ή αιολικής παραγωγής στην μπαταρία ενός συνδεδεμένου οχήματος και να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα. Έτσι, δεν θα χρειαστεί η καταφυγή σε ακριβή και λιγότερο πράσινη ηλεκτρική ενέργεια, βοηθώντας στην επίτευξη του στόχου της απανθρακοποίησης [31].

4.9 Έργα Vehicle-to-Grid ανά τον Κόσμο

Η τεχνολογία V2G είναι μία μεγάλη καινοτομία η οποία μέχρι στιγμής δεν έχει εδραιωθεί για πολλούς και διαφορετικούς λόγους, όπως η έλλειψη της απαραίτητης υποδομής, το κόστος και διάφορες τεχνικές προκλήσεις. Ωστόσο, στην επιστημονική κοινότητα φαίνεται να προκαλεί μεγάλο ενδιαφέρον το οποίο τεκμηριώνεται από την ύπαρξη πολλαπλών πιλοτικών έργων που διεξάγονται ανά τον κόσμο. Στην συνέχεια, γίνεται μία σύνοψη από δύο γνωστά παραδείγματα έργων.

Το Parker Project (Δανία, 2016-2019) αποτέλεσε ένα έργο το οποίο χρησιμοποίησε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα και φορτιστές διπλής κατεύθυνσης για την εκτέλεση διαφόρων δοκιμών στην πλατφόρμα PowerLabDk, η οποία χρησιμοποιείται για έρευνα στα ενεργειακά συστήματα. Οι δοκιμές αφορούσαν επικουρικές υπηρεσίες δικτύου και κατά πόσο η τεχνολογία V2G μπορεί να κλιμακωθεί και να θεμελιωθεί σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και αγορές. Τα ευρήματα του πρότζεκτ, ανέδειξαν ότι είναι τεχνικά εφικτό να χρησιμοποιηθεί για υπηρεσίες ρύθμισης και μπορεί να επεκταθεί με μεγαλύτερο αριθμό Η/Ο, μεγέθη μπαταριών, γεωγραφικές περιοχές κ.α. αρκεί να υπάρξει η απαραίτητη τεχνική βελτίωση του δικτύου και η ευρύτερη αποδοχή από τους καταναλωτές [32].

Στο έργο Powerloop Project (Ηνωμένο Βασίλειο, 2022) συμμετείχε ένα σύνολο 135 πελατών, οι οποίοι πελάτες έλαβαν οικονομικά κίνητρα για τη συμμετοχή τους, με μηνιαία επιβράβευση £30 εάν είχαν το όχημά τους συνδεδεμένο στον φορτιστή τους και ήταν διαθέσιμοι για την υπηρεσία V2G μεταξύ 4-7 μ.μ. Στο πλαίσιο του πρότζεκτ σχεδιάστηκε η εφαρμογή Powerloop app. Η εφαρμογή ήταν σχεδιασμένη έτσι ώστε να παρέχει διάφορες δυνατότητες και επιλογές στους χρήστες για τη διαχείριση της φόρτισης και αποφόρτισης των οχημάτων τους και πληροφορίες όπως οι kWh που στάλθηκαν στο δίκτυο. Οι περισσότεροι, όμως, αντιμετώπισαν προβλήματα και διακοπές συνδεσιμότητας Wi-Fi με την εφαρμογή Powerloop. Πάρα ταύτα, το 85% των συμμετεχόντων δήλωσε ότι θα χρησιμοποιούσε ξανά την υπηρεσία [33].

4.10 Στρατηγικές φόρτισης για τη ρύθμιση συχνότητας

Τα τελευταία χρόνια, ένα αυξανόμενο σώμα βιβλιογραφίας έχει εξετάσει την έννοια του V2G, εστιάζοντας στην εφαρμογή των ηλεκτρικών οχημάτων για τη ρύθμιση της συχνότητας. Διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου V2G μπορούν να μειώσουν την απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική τιμή, ρυθμίζοντας κατάλληλα το προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης των εμπλεκόμενων οχημάτων. Κάθε μπαταρία, δεδομένου του σήματος απόκλισης της συχνότητας, τροποποιεί την έξοδο της αναλογικά. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διάφορες προσεγγίσεις ελέγχου για τη διαχείριση των Η/Ο όπως έχουν αναλυθεί στη βιβλιογραφία [34].

4.10.1 Στοιχειώδης έλεγχος - Elementary Control (ElCo)

Η στοιχειώδης προσέγγιση για τις μπαταρίες που συμμετέχουν σε μηχανισμούς ρύθμισης της συχνότητας είναι να μιμηθούν το σχήμα ελέγχου των σύγχρονων

γεννητριών. Οι σύγχρονες γεννήτριες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ρύθμισης αλλάζουν την έξοδό τους, αυξάνοντας ή μειώνοντας την ισχύ στην έξοδο. Αυτή πρέπει πάντα να είναι θετική. Απεναντίας, οι μπαταρίες μπορούν επίσης να αντιστρέψουν τη ροή της ισχύος, λειτουργώντας είτε ως γεννήτριες ή ως φορτία. Ο στοιχειώδης έλεγχος ορίζεται από τις σχέσεις:

$$P_i(k) = \begin{cases} K_i^c \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) \geq 0 \\ K_i^d \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) < 0 \\ P_i^{max} & \text{εάν } K_i^c \Delta f(k) \geq P_i^{max} \\ -P_i^{max} & \text{εάν } K_i^d \Delta f(k) \leq -P_i^{max} \end{cases}$$

$\Delta f(k)$: η απόκλιση συχνότητας την χρονική στιγμή k , $\Delta f(k) = f(k) - f_o$

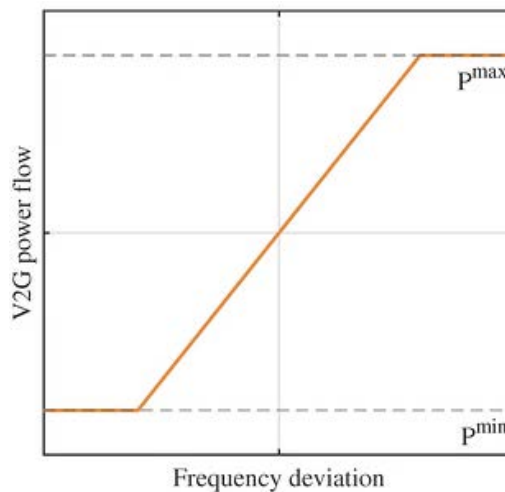
$f(k)$: τιμή συχνότητας που μετράται την χρονική στιγμή k

f_o : ονομαστική τιμή συχνότητας

K_i^c : συντελεστής droop κατά την διαδικασία φόρτισης

K_i^d : συντελεστής droop κατά την διαδικασία της εκφόρτισης

Οι παράμετροι K_i^c , K_i^d είναι χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζονται από το σύστημα ελέγχου της μπαταρίας [34]. Η Εικόνα 4.7 αναπαριστά τη ροή ισχύος του στοιχειώδους ελέγχου συναρτήσει της απόκλισης συχνότητας.



Εικόνα 4.7: Ροή ισχύος στοιχειώδους ελέγχου [34]

Η προαναφερθείσα στρατηγική είναι ιδιαίτερα πολύτιμη από πλευράς ρύθμισης της συχνότητας ενώ έρχονται σε δεύτερη μοίρα η υποβάθμιση της μπαταρίας και η τελική κατάσταση φόρτισης [34].

4.10.2 Έλεγχος Ισορροπίας - Balance Control (BaCo)

Ο έλεγχος ισορροπίας στοχεύει στην διατήρηση του ποσοστού φόρτισης στην προκαθορισμένη τιμή παράλληλα με την ρύθμιση της συχνότητας. Παρόμοια, η ανταλλαγή ισχύος από το i -οστό όχημα με το δίκτυο την χρονική στιγμή k ισούται με:

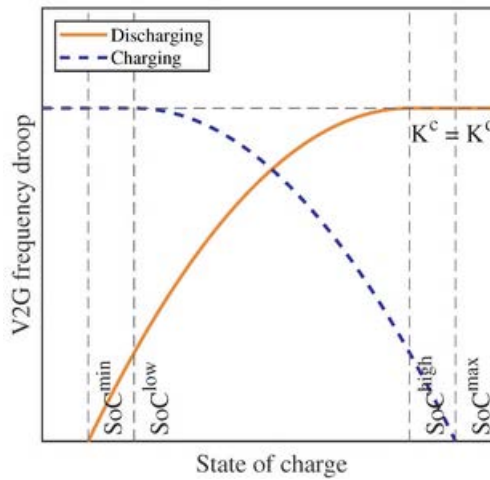
$$P_i(k) = \begin{cases} K_i^c(k)\Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) \geq 0 \\ K_i^d(k)\Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) < 0 \\ P_i^{max} & \text{εάν } K_i^c\Delta f(k) \geq P_i^{max} \\ -P_i^{max} & \text{εάν } K_i^d\Delta f(k) \leq -P_i^{max} \end{cases}$$

με τις τιμές των $K_i^c(k), K_i^d(k)$ να μεταβάλλονται χρονικά σύμφωνα με τις παρακάτω αντίστοιχες σχέσεις:

$$K_i^c(k) = K_{max} \left(1 - \left(\frac{SoC_i(k) - SoC_i^{low}}{SoC_i^{max} - SoC_i^{low}} \right)^2 \right)$$

$$K_i^d(k) = K_{max} \left(1 - \left(\frac{SoC_i(k) - SoC_i^{high}}{SoC_i^{min} - SoC_i^{high}} \right)^2 \right)$$

Όπου $SoC_i^{low}, SoC_i^{max}, SoC_i^{min}, SoC_i^{high}$ ορίζουν τις τιμές ορίων εντός των οποίων η κατάσταση φόρτισης πρέπει να διατηρείται και K_{max} είναι ο μέγιστος συντελεστής droop. Η Εικόνα 4.7 αναπαριστά τη ροή ισχύος του ελέγχου ισορροπίας συναρτήσει της απόκλισης συχνότητας [34].



Εικόνα 4.8: Ροή ισχύος ελέγχου ισορροπίας [34]

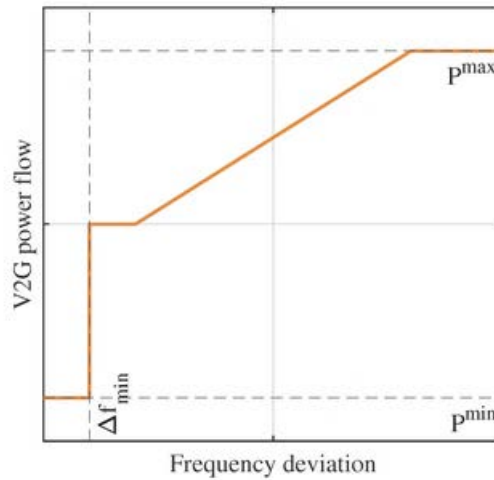
Το σημείο τομής των δύο καμπυλών υποδηλώνει την τελική κατάσταση φόρτισης η οποία διατηρείται μετά το πέρας της διαδικασίας ρύθμισης. Για παράδειγμα, για $SoC_i^{low} = 0.2, SoC_i^{max} = 0.9, SoC_i^{min} = 0.1, SoC_i^{high} = 0.8$ η κατάσταση φόρτισης ισορροπεί στην τιμή $SoC = 0.5$ [34].

4.10.3 Έξυπνος Έλεγχος Φόρτισης - Smart Charging Control (SmChCo)

Πρόκειται για μια τεχνική ελέγχου γρήγορης φόρτισης που μπορεί να φορτίζει τη μπαταρία και να συμμετέχει στην υπηρεσία πρωτεύουσας ρύθμισης. Πιο αναλυτικά ορίζεται ως:

$$P_i = \begin{cases} \frac{K_{max}}{2} \Delta f(k) + \frac{P_i^{max}}{2} & \text{εάν } K_{max} \Delta f(k) \leq P_i^{max} \\ P_i^{max} & \text{εάν } K_{max} \Delta f(k) > P_i^{max} \\ 0 & \text{εάν } K_{max} \Delta f(k) < -P_i^{max} \\ -P_i^{max} & \text{εάν } \Delta f(k) \leq \Delta f_{min} \end{cases}$$

Ο έξυπνος έλεγχος φόρτισης έχει διμερή λειτουργία, καθώς υποστηρίζει τη ρύθμιση συχνότητας παράλληλα με τη φόρτιση της μπαταρίας. Δηλαδή με τον όρο $\frac{K_{max}}{2} \Delta f(k)$ η μπαταρία ανταποκρίνεται στην απόκλιση συχνότητας, ενώ με το άλλο μισό $\frac{P_i^{max}}{2}$ χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του οχήματος. Εάν η απόκλιση συχνότητας πέσει κάτω από ένα δεδομένο όριο, εφαρμόζεται άμεσα η πολιτική μέγιστης εκφόρτισης για να υποστηριχθεί η συχνότητα του κύριου δικτύου. Η Εικόνα 4.9 αναπαριστά τη ροή ισχύος του έξυπνου ελέγχου συναρτήσει της απόκλισης συχνότητας [34].



Εικόνα 4.9: Ροή ισχύος έξυπνου ελέγχου φόρτισης [34]

Είναι εμφανές ότι αυτή η προσέγγιση διαφέρει από τον Στοιχειώδη Έλεγχο, διότι η μπαταρία φορτίζεται, ακόμα και αν η συχνότητα είναι αρνητική. Αυτή η προσέγγιση παρέχει ταχεία φόρτιση ωστόσο, δεν είναι αποτελεσματική για την ευστάθεια του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [34].

4.10.4 Περιορισμένος Έλεγχος – Bounded Control (BoCo)

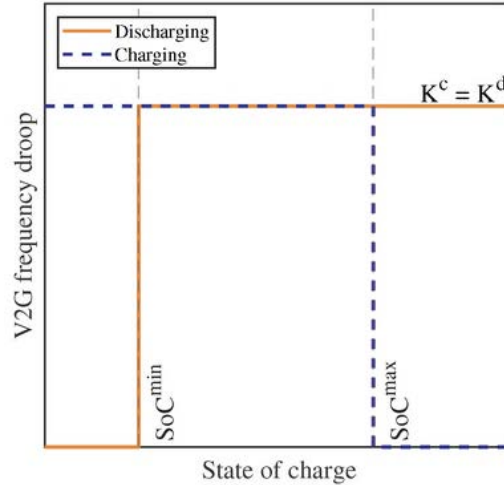
Στην περίπτωση της εφαρμογής του περιορισμένου ελέγχου σε ηλεκτρικά οχήματα, το ποσοστό που σχετίζεται με τη φόρτιση ή αποφόρτιση της μπαταρίας του οχήματος θα υπόκειται σε συγκεκριμένα όρια. Η Εικόνα 4.10 αναπαριστά τη ροή ισχύος του περιορισμένου ελέγχου συναρτήσει της απόκλισης συχνότητας [34].

$$P_i(k) = \begin{cases} K_i^c(k) \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) \geq 0 \\ K_i^d(k) \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) < 0 \\ P_i^{max} & \text{εάν } K_i^c \Delta f(k) \geq P_i^{max} \\ -P_i^{max} & \text{εάν } K_i^d \Delta f(k) \leq -P_i^{max} \end{cases}$$

Όπου

$$K_i^c(k) = \begin{cases} K_i^c & \text{εάν } SOC_i(k) \leq SOC_i^{max} \\ 0 & \text{εάν } SOC_i(k) > SOC_i^{max} \end{cases}$$

$$K_i^d(k) = \begin{cases} K_i^d & \text{εάν } SOC_i(k) \geq SOC_i^{min} \\ 0 & \text{εάν } SOC_i(k) < SOC_i^{min} \end{cases}$$



Εικόνα 4.10: Ροή ισχύος περιορισμένου ελέγχου [34]

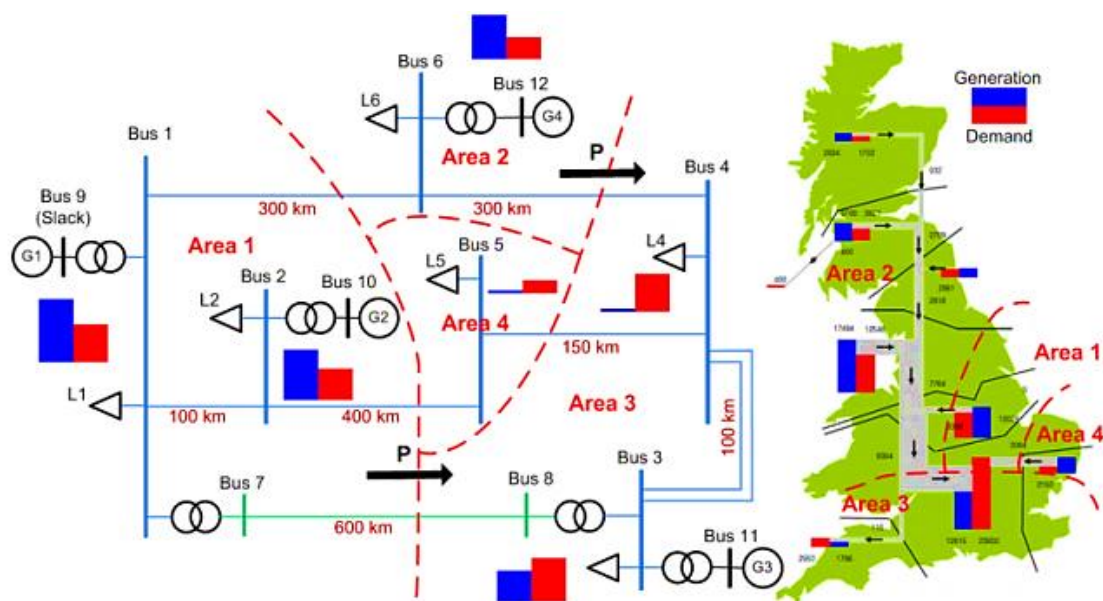
Η στρατηγική του Περιορισμένου Ελέγχου διαφέρει ελάχιστα από τον Στοιχειώδη Έλεγχο αφού οι μπαταρίες ακολουθούν ακριβώς την ίδια αντίδραση στην απόκλιση της συχνότητας. Είναι εξίσου πολύτιμη στρατηγική από άποψης ευστάθειας δικτύου ενώ εξαναγκάζει τις μπαταρίες σε λειτουργία μακριά από ακραίες τιμές της κατάστασης φόρτισης οι οποίες οδηγούν στην υποβάθμιση και αρνητική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας [34].

Κεφάλαιο 5

Μοντελοποίηση Συστήματος

5.1 Περιγραφή Δοκιμαστικού Συστήματος

Η υψηλή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των υποδομών φόρτισης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί ένα κατάλληλο μοντέλο συστήματος για την αξιολόγηση των επιπτώσεων στην ευστάθεια του. Έτσι, τα συστατικά του συστήματος όπως οι σταθμοί παραγωγής πρέπει να αναπαρίστανται με ακρίβεια, για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση του συστήματος. Επιπλέον, το μοντέλο πρέπει να είναι απλό και υπολογιστικά διαχειρίσιμο προκειμένου να υποστηρίξει πολλαπλά σενάρια με διαφορετικές παραμέτρους και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση να γίνονται εύκολα κατανοητά. Ακολουθεί λοιπόν, η παρουσίαση ενός γενικού μοντέλου συστήματος ενέργειας για την υποστήριξη της μελέτης ενσωμάτωσης ΑΠΕ και Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το γενικό μοντέλο 12 ζυγών της IEEE το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 5.1 [35].



Εικόνα 5.1: Γενικό μοντέλο 12 ζυγών [35]

Το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί παρόμοιο με το σύστημα ηλεκτροδότησης του Ηνωμένου Βασιλείου όσον αφορά την κατεύθυνση των ροών ενέργειας. Φαίνεται να αντιπροσωπεύει ένα απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, που αποτελείται από 4 περιοχές

1. Περιοχή 1: Αποτελεί τη μεγαλύτερη γεωγραφικά περιοχή και χαρακτηρίζεται και από τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας στο σύστημα, η οποία βασίζεται κυρίως στην θερμική παραγωγή. Η συγκεκριμένη περιοχή, περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα φορτίων καθώς αποτελείται από ένα μείγμα βιομηχανικών και κατοικημένων περιοχών. Η παρουσία του συγκεκριμένου μείγματος φορτίων την καθιστά σημαντικό παράγοντα της συνολικής ζήτησης ενέργειας του συστήματος.
2. Περιοχή 2: Η συγκεκριμένη περιοχή εκμεταλλεύεται την δυναμική των υδάτινων πόρων και κυριαρχεί η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας. Υπάρχει ένα μικρό ποσοστό αγροτικών φορτίων, τα οποία έχουν μικρότερες απαιτήσεις ενέργειας σε σχέση με την περιοχή 1.
3. Περιοχή 3: Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από βαριά βιομηχανικά φορτία και εξαρτάται επίσης από τη θερμική παραγωγή ενέργειας. Τα βιομηχανικά κέντρα έχουν τυπικά υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, επομένως αυτή η περιοχή συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική κατανάλωση ενέργειας.
4. Περιοχή 4: Πλούσια σε αιολικούς πόρους, αυτή η περιοχή είναι κατάλληλη για την παραγωγή αιολικής ενέργειας. Η σύνδεση του αιολικού πάρκου γίνεται στον ζυγό 5 [35].

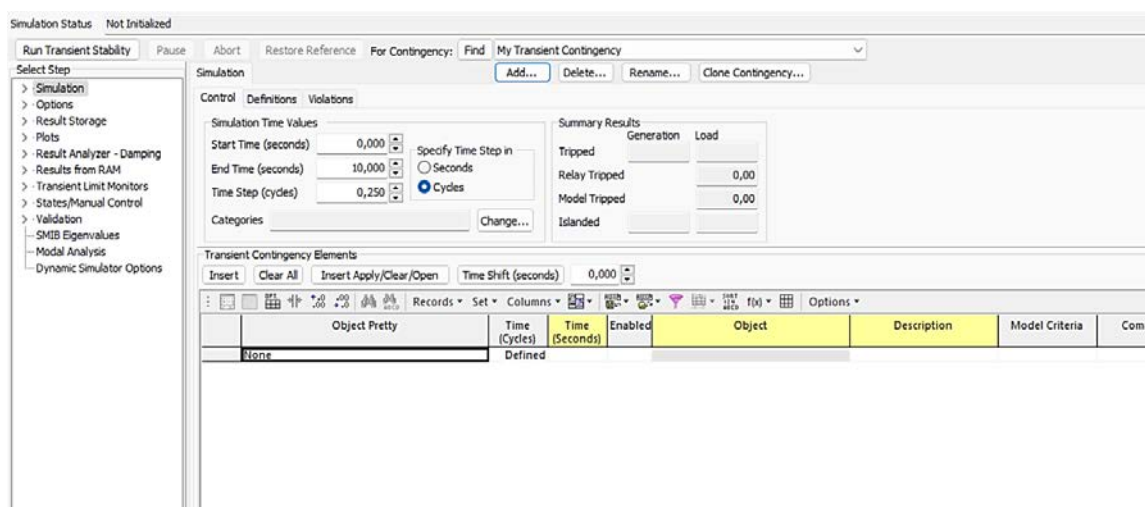
5.2 Το λογισμικό PowerWorld Simulator

Το λογισμικό PowerWorld Simulator είναι ένα διαδραστικό πακέτο προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδιασμένο έτσι ώστε να είναι εύκολο και φιλικό προς τον χρήστη χάρη στο εύχρηστο γραφικό περιβάλλον του. Αποτελείται από ένα σύνολο δυνατοτήτων όπως η ταχύτατη και ακριβής ανάλυση ροής φορτίου μεγάλων συστημάτων. Το σύστημα οπτικοποιείται με έγχρωμα κινούμενα μονογραμμικά διαγράμματα τα οποία μπορούν να εισαχθούν είτε ως αρχείο ή να κατασκευαστούν επιτόπου εξ' ολοκλήρου.

Στην παρούσα εργασία, αξιοποιείται η πρόσθετη λειτουργία του λογισμικού, Transient Stability. Η λειτουργία Transient Stability μπορεί να εκτελέσει την ανάλυση μεταβατικής

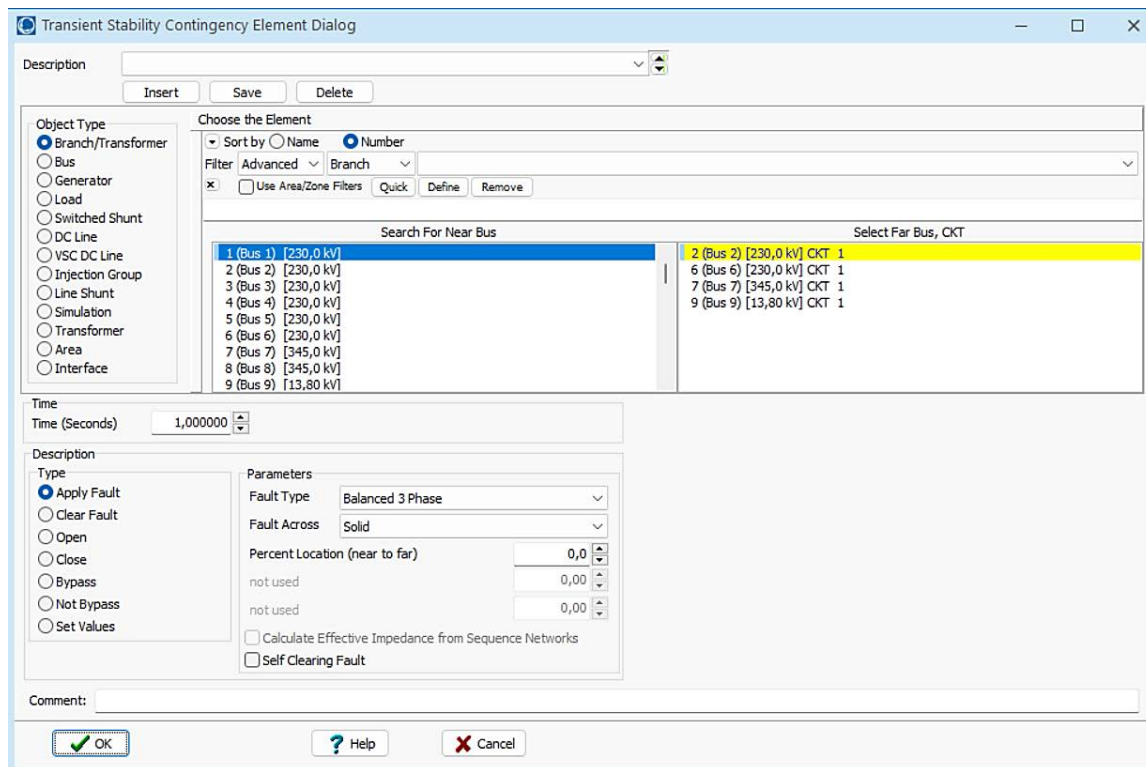
ευστάθειας επιτρέποντας στον χρήστη να μελετά τις δυναμικές αποκρίσεις του συστήματος μετά τον ορισμό και την εισαγωγή διαταραχών.

Τυπικά, με τη λειτουργία Transient Stability, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει πληθώρα διαταραχών, να ορίσει τον χρόνο και το βήμα της προσομοίωσης και να λάβει ποσοτικά αποτελέσματα για οποιαδήποτε ποσότητα του συστήματος και σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται και μπορούν να αναπαρασταθούν με αντίστοιχα διαγράμματα της ποσότητας ενδιαφέροντος σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 5.2: Περιβάλλον λειτουργίας Transient Stability

Ο χρήστης μπορεί να εισάγει μεγάλο πλήθος διαφορετικών διαταραχών όπως βραχυκυκλώματα όλων των ειδών και σε κάθε σημείο του συστήματος, άνοιγμα και κλείσιμο διακοπών, απομάκρυνση παραγωγής ή φορτίου, μείωση ή αύξηση παραγωγής και φορτίου και πολλές άλλες. Το παράθυρο εισαγωγής διαταραχών φαίνεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3: Παράθυρο εισαγωγής διαταραχών

5.3 Μοντελοποίηση Σταθμών Παραγωγής

Η χρήση της λειτουργίας Transient Stability προϋποθέτει τον ορισμό δυναμικών μοντέλων των γεννητριών για την εκτέλεση της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας. Στην παρούσα εργασία, αναζητήθηκαν στην βιβλιογραφία μοντέλα εγκεκριμένα για ερευνητικούς σκοπούς έτσι ώστε να τελεστεί η προσομοίωση της λειτουργίας των διατάξεων που αντιπροσωπεύουν, με την μέγιστη δυνατή σαφήνεια. Ακολουθήθηκε η κατευθυντήρια γραμμή που ορίζεται από το Συντονιστικό Συμβούλιο της Δυτικής Ηλεκτρικής Ενέργειας (WECC) έτσι όπως αναγράφεται στο έγγραφο Typical Machine Data for Power System Simulation Modeling και περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την σωστή προσομοίωση [36].

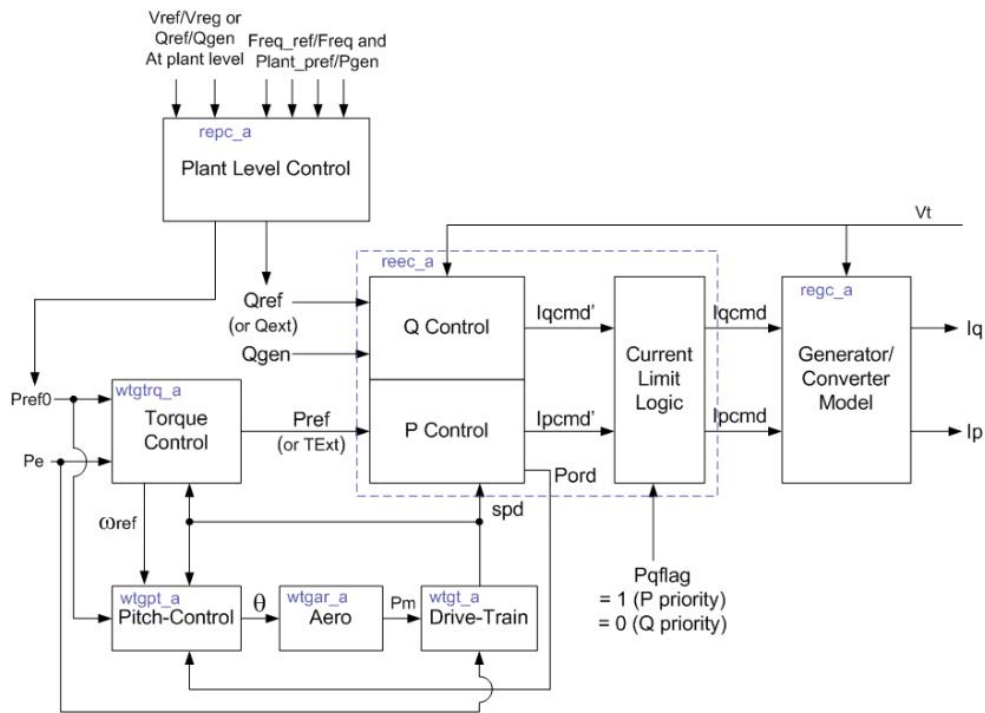
Οι σταθμοί θερμικής και υδροηλεκτρικής παραγωγής, στην ανάλυση τους μέσω του λογισμικού PowerWorld Simulator ακολουθούν την ίδια δομή και χαρακτηρίζονται από τέσσερα επιμέρους πεδία.

1. Machine (Μοντέλο μηχανής): Αναφέρεται στο μαθηματικό μοντέλο που αναπαριστά τη λειτουργία της μηχανής της γεννήτριας. Περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η σταθερά αδράνειας, ο συντελεστής απόσβεσης καθώς και επαγωγές και αντιστάσεις του κυκλώματος της μηχανής.

2. Exciter (Διεγέρτης): Αντιπροσωπεύει το σύστημα του διεγέρτη το οποίο τροφοδοτεί με ρεύμα διέγερσης τα τυλίγματα της γεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο ρυθμίζεται η τάση εξόδου της γεννήτριας και κατ' επέκταση η ευστάθεια τάσης του συστήματος.
3. Governor (Ρυθμιστής ταχύτητας): Αποτελεί τον ρυθμιστή στροφών της μονάδας, δηλαδή τον ρυθμιστή της συχνότητας του συστήματος.
4. Stabilizer (Σταθεροποιητής): Αποσβένει τις ταλαντώσεις του συστήματος και βελτιώνει την δυναμική συμπεριφορά της γεννήτριας.

Η παράσταση ενός αιολικού πάρκου με Α/Γ διπλής τροφοδοσίας (τύπου 3) είναι αρκετά πολυπλοκότερη καθώς συνίσταται από 7 μέρη, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 5.4. Λεπτομερέστερα καθεμία από τις υπομονάδες που διαθέτει συντελούν μία διακριτή λειτουργία η οποία αθροιστικά αναπαριστά το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Περιγραφικά, υπάρχει:

1. Το μοντέλο της μηχανικά ελεγχόμενης γεννήτριας (`regc_a`) που εισάγεται στο πεδίο Machine. Δέχεται ως εισόδους τις εντολές ρεύματος (`Ipcmd`, `Iqcmd`) και παράγει τα ρεύματα (`Ip`, `Iq`) που εγχέει στο δίκτυο.
2. Το μοντέλο ηλεκτρικού ελεγκτή (`reec_a`) που εισάγεται στο πεδίο Exciter. Λαμβάνει ως είσοδο τις τιμές αναφοράς πραγματικής και αέργου ισχύος (`Pref`, `Qref`) καθώς και την ανάδραση της παραγόμενης αέργου ισχύος (`Qgen`). Οι έξοδοι του είναι οι εντολές πραγματικού και αέργου ρεύματος (`Ipcmd`, `Iqcmd`).
3. Το μοντέλο εξομοίωσης του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης (`drive-train`) της Α/Γ που αναπαριστά τη διαδικασία μετάβασης της περιστροφικής κίνησης από τις λεπίδες που κινούνται λόγω αιολικής ενέργειας στην γεννήτρια της διάταξης. Εισάγεται στο πεδίο του Governor. Η έξοδος του είναι ένα διάνυσμα ταχύτητας $spd=[\omega_t, \omega_g]$.
4. Το αεροδυναμικό μοντέλο (`wtagr_a`) το οποίο περιλαμβάνει τις αεροδυναμικές ιδιότητες της Α/Γ όπως η θέση των λεπίδων.
5. Το μοντέλο ελεγκτή `pitch` της ανεμογεννήτριας (`wtgpt_a`) που ελέγχει τη γωνία των πτερυγίων της Α/Γ.
6. Μια απλή εξομοίωση του ελέγχου ροπής της ανεμογεννήτριας (`wgtrq_a`).
7. Ένας απλός ελεγκτής ανανεώσιμης ενέργειας (`repc_a`) που διαχειρίζεται την ευσταθή διασύνδεση της εγκατάστασης με το δίκτυο [21].



Εικόνα 5.4: Δομή συνολικού μοντέλου εξομοίωσης Α/Γ τύπου 3 [21]

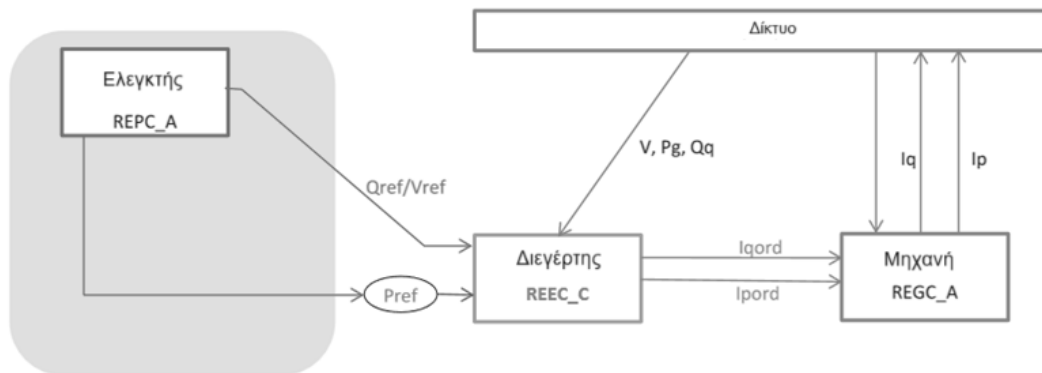
Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν σε κάθε περίπτωση, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, είναι διαθέσιμα τα διαγράμματα μπλοκ που επεξηγούν την λειτουργία τους.

Πίνακας 5.1: Μοντέλα προσομοίωσης σταθμών παραγωγής

Πεδίο	Θερμοηλεκτρικός Σταθμός	Υδροηλεκτρικός Σταθμός	Αιολικό Πάρκο (Α/Γ τύπου 3 DFIG)
Machine	GENTPJ	GENTPJ	REGC_A
Exciter	ESST4B	ESST4B	REEC_A
Governor	GGOV1	HYG3	WTGT_A
Stabilizer	PSS2A	PSS2A	WTGPT_A
Plant Controller			REPC_A
Aerodynamic Model			WTGAR_A
Pref Controller			WTGTRQ_A

5.4 Μοντελοποίηση διαδικασίας φόρτισης

Για την αναπαράσταση της διαδικασίας αμφίδρομης φόρτισης ενός συνόλου Η/Ο αξιοποιείται ένα μοντέλο συστήματος αποθήκευσης με μπαταρία. Η μοντελοποίηση ενός μέσου αποθήκευσης ενέργειας στο περιβάλλον του λογισμικού PowerWorld Simulator καθιστά απαραίτητη την διάκριση του σε 3 επιμέρους μοντέλα υποσυστημάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5: Μοντέλο συστήματος αποθήκευσης με μπαταρία [37]

Απαρτίζεται λοιπόν από τα επιμέρους μοντέλα:

1. Το μοντέλο REGC_A εισάγεται στο πεδίο Machine. Στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύει την διεπαφή μπαταρίας/μετατροπέα (inverter) με το δίκτυο.
2. Το μοντέλο ηλεκτρικού ελεγκτή REEC_C εισάγεται στο πεδίο Exciter. Η σημαντικότητα του φανερώνεται από την αρμοδιότητα που έχει να ελέγχει τις διαδικασίες της φόρτισης και εκφόρτισης.
3. Το μοντέλο REPC_A που αναλαμβάνει τον έλεγχο τάσης και συχνότητας προσαρμόζοντας κατάλληλα την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος στην έξοδο του [37].

5.4.1 Λειτουργία Φόρτισης και Εκφόρτισης (REEC_C)

Με τη βοήθεια του παραπάνω μοντέλου δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να υπολογίζει κάθε στιγμή το ποσοστό φόρτισης SOC (State Of Charge) της μπαταρίας. Η τιμή του εξαρτάται από την έξοδο πραγματικής ισχύος της μονάδας, ξεκινώντας πάντα από την αρχική κατάσταση SOC_{init} που ορίζεται από τον χρήστη. Η τιμή SOC εκφράζει τη διαθέσιμη ενέργεια ως ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας.

Τυπικά, υπολογίζεται από την σχέση

$$SOC = \frac{E_{\text{διαθέσιμη}}}{E_{\text{ονομαστική}}} = \frac{P_{\text{διαθέσιμη}} \times T_{\text{φόρτισης ή εκφόρτισης}}}{P_{\text{ονομαστική}} \times T_{\text{φόρτισης ή εκφόρτισης}}}$$

Όπου,

$E_{\text{διαθέσιμη}}$: Διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας

$E_{\text{ονομαστική}}$: Ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας

$P_{\text{διαθέσιμη}}$: Πραγματική ισχύς που παρέχεται ή απορροφάται

$T_{\text{φόρτισης ή εκφόρτισης}}$: Χρόνος πλήρους φόρτισης ή εκφόρτισης μπαταρίας

Η τιμή αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης και η μεταβολή της υπολογίζεται βάσει της ισχύος που παράγεται ή καταναλώνεται ανά τον χρόνο:

$$\Delta SOC = \frac{P_{\text{εξόδου}}(t_o) \times \Delta t}{P_{\text{ονομαστική}} \times T_{\text{φόρτισης ή εκφόρτισης}}}$$

Όπου,

$P_{\text{εξόδου}}$: Ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται τη χρονική στιγμή t_o

Δt : Χρονικό διάστημα υπολογισμού της μεταβολής ΔSOC

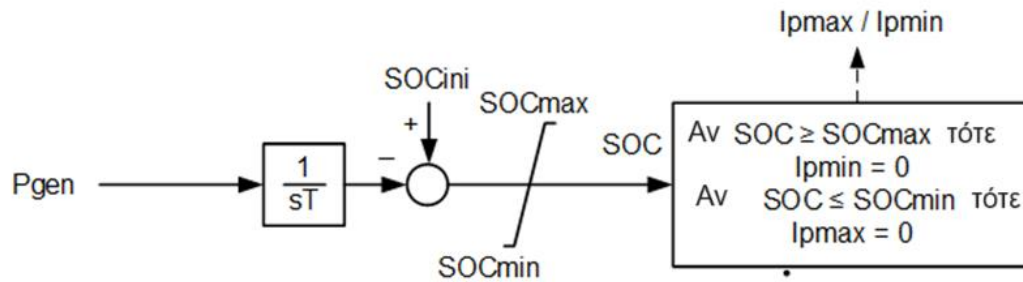
$P_{\text{ονομαστική}}$: Ονομαστική ισχύς μπαταρίας

$T_{\text{φόρτισης ή εκφόρτισης}}$: Χρόνος πλήρους φόρτισης ή εκφόρτισης μπαταρίας

Ο χρήστης είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό της μέγιστης και ελάχιστης επιτρεπόμενης κατάστασης φόρτισης (SOC_{max} , SOC_{min}) και του χρόνου πλήρους φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας (T). Η διαδικασία φόρτισης ή αποφόρτισης διακόπτεται όταν ισχύει τουλάχιστον ένας εκ των δύο περιορισμών:

1. $SOC \geq SOC_{max}$
2. $SOC \leq SOC_{min}$

Η διαδικασία τερματισμού της φόρτισης ή αποφόρτισης επεξηγείται από το διάγραμμα στην Εικόνα 5.6.

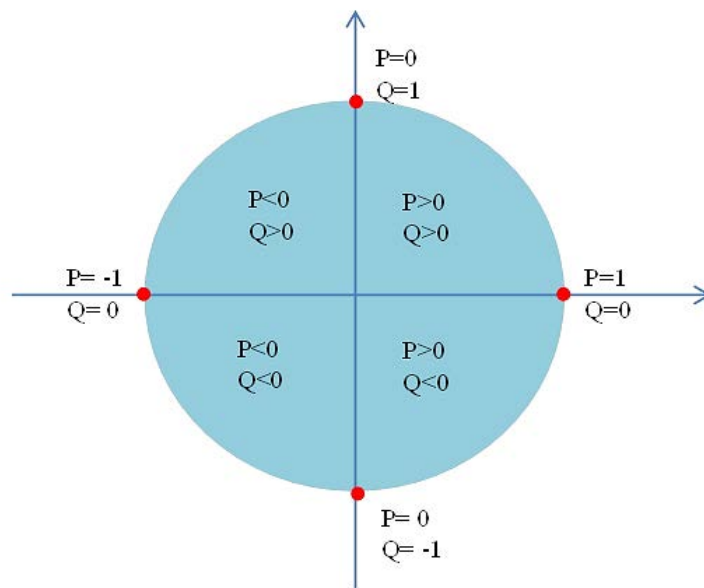


Εικόνα 5.6: Διαδικασία τερματισμού φόρτισης ή αποφόρτισης [37]

Οι μεταβλητές I_{pmax} και το I_{pmin} είναι το μέγιστο και ελάχιστο όριο ενεργού ρεύματος που επιστρέφει η μπαταρία στο δίκτυο, αντίστοιχα. Με τον μηδενισμό αυτών των ορίων όταν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας φτάσει στα όρια της, οι διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης τερματίζονται [37].

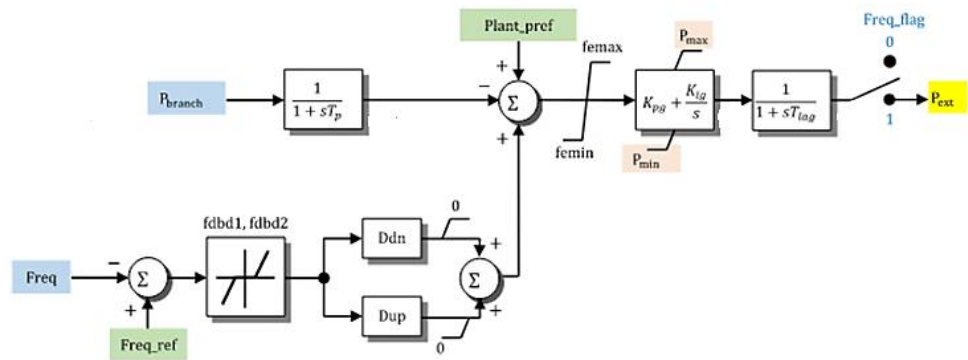
5.4.2 Λειτουργία Ρύθμισης Συχνότητας (REPC_A)

Για να μπορεί να εκτελεί ταυτόχρονα τον έλεγχο συχνότητας και τάσης θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε καθένα από τα τέσσερα τεταρτημόρια που φαίνονται στην Εικόνα 5.7. Ο έλεγχος τεσσάρων τεταρτημορίων υποδηλώνει ότι η ροή της κατεύθυνσης του πραγματικού ρεύματος μπορεί είναι τέτοια έτσι ώστε η διάταξη να φορτίζει ή να εκφορτίζει. Ταυτόχρονα και ανεξάρτητα, ρυθμίζεται η άεργος ισχύς η οποία μπορεί να παράγεται ή να καταναλώνεται.



Εικόνα 5.7: Κατανομή Πραγματικής και Άεργης Ισχύος [37]

Η διαδικασία ρύθμισης συχνότητας υποστηρίζεται από το συγκεκριμένο μοντέλο αποθήκευσης ενέργειας. Το τμήμα REPC_A υπολογίζει την τιμή P_{ext} με την οποία τροφοδοτεί το REEC_C και έτσι δίνεται η δυνατότητα ελέγχου πραγματικής ισχύος - συχνότητας. Στην Εικόνα 5.8, φαίνεται το διάγραμμα που περιγράφει τη ρύθμιση συχνότητας σε συνδυασμό με τις παραμέτρους που λαμβάνουν μέρος σε αυτή. Το διάγραμμα περιγράφει έναν μηχανισμό ελέγχου που αντιδρά σε αποκλίσεις συχνότητας με την προσαρμογή της παραγόμενης ή απορροφώμενης ισχύος, προκειμένου να διατηρήσει τη συχνότητα του συστήματος κοντά στην ονομαστική τιμή.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα Ρύθμισης Συχνότητας με το μοντέλο REPC_A

Αρχικά, προσμετράται η ισχύς P_{branch} του κλάδου του συστήματος που ελέγχεται από το μοντέλο. Το σήμα φιλτράρεται έτσι ώστε να εξομαλυνθούν πιθανές απότομες μεταβολές. Συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς $Plant_pref$ και εξάγεται η διαφορά τους που εκφράζει ένα σφάλμα στην ισχύ. Σε αυτή την τιμή θα προστεθεί η ισχύς που καθορίζεται λόγω απόκλισης συχνότητας

Η συχνότητα του ζυγού $Freq$, στον οποίο βρίσκεται εγκατεστημένη η μονάδα αποθήκευσης προσμετράται και συγκρίνεται με τη συχνότητα αναφοράς $Freq_ref$. Έτσι, υπολογίζεται η τιμή της απόκλισης συχνότητας Δf . Αυτή η τιμή ελέγχεται για το εάν βρίσκεται σε ένα εύρος τιμών «νεκρής ζώνης» η οποία ορίζεται από τα όρια $fdb1, fdb2$.

$$\Delta f_{db} = \begin{cases} 0, & \text{εάν } |\Delta f| < f_{db1} \\ \Delta f, & \text{εάν } |\Delta f| \geq f_{db2} \end{cases}$$

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζεται με τις τιμές Dup, Ddn για ρύθμιση προς τα πάνω και κάτω αντίστοιχα. Οι Ddn και Dup αντιπροσωπεύουν το αντίστροφο της παραμέτρου στατισμού (droop) και καθορίζουν πώς η ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με την απόκλιση

συχνότητας.

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

Όταν $\Delta f(k) < 0$ τότε $P_{up} = Dup \cdot \Delta f_{db}$

Όταν $\Delta f(k) \geq 0$ τότε $P_{down} = Ddn \cdot \Delta f_{db}$

Το σήμα εξόδου τελικά θα περάσει από ένα μπλοκ περιορισμού συχνότητας και στη συνέχεια ένα μπλοκ περιορισμού ισχύος στο εύρος (P_{min}, P_{max}) . Τέλος, το σήμα περνάει από ένα μπλοκ χρονικής καθυστέρησης που προσομοιώνει την καθυστέρηση στη φυσική απόκριση του συστήματος.

5.4.3 Παράσταση Περιορισμένου Ελέγχου με τα μοντέλα REEC_C, REPC_A

Αξιοποιώντας τα μοντέλα REEC_C, REPC_A και κάνοντας ορισμένες παραδοχές, υποστηρίζεται η δυνατότητα εφαρμογής του περιορισμένου ελέγχου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επαναλαμβάνεται ότι ο περιορισμένος έλεγχος ορίζεται από τις σχέσεις:

$$P = \begin{cases} K_i^c \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) \geq 0 \\ K_i^d \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) < 0 \\ P_i^{max} & \text{εάν } K_i^c \Delta f(k) \geq P_i^{max} \\ -P_i^{max} & \text{εάν } K_i^d \Delta f(k) \leq -P_i^{max} \end{cases}$$

$$K_i^c(k) = \begin{cases} K_i^c & \text{εάν } SOC_i(k) \leq SOC_i^{max} \\ 0 & \text{εάν } SOC_i(k) > SOC_i^{max} \end{cases}$$

$$K_i^d(k) = \begin{cases} K_i^d & \text{εάν } SOC_i(k) \geq SOC_i^{min} \\ 0 & \text{εάν } SOC_i(k) < SOC_i^{min} \end{cases}$$

Όπου

$\Delta f(k)$: η απόκλιση συχνότητας την χρονική στιγμή k

K_i^c : συντελεστής droop κατά την διαδικασία φόρτισης

K_i^d : συντελεστής droop κατά την διαδικασία της εκφόρτισης

Ισοδύναμα με την εκμετάλλευση του μοντέλου REPC_A:

$$P = \begin{cases} Ddn \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) \geq 0 \\ Dup \Delta f(k) & \text{εάν } \Delta f(k) < 0 \\ P_{max} & \text{εάν } Dup \Delta f(k) \geq P_{max} \\ P_{min} & \text{εάν } Ddn \Delta f(k) \leq P_{min} \end{cases}$$

Με τις παραδοχές ότι ισχύει:

$$P_{min} = -P_{max}$$

$$f_{ab1} = f_{ab2} = 0$$

$$K_i^c = Ddn$$

$$K_i^d = Dup$$

Με την αξιοποίηση του μοντέλου REEC_C οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης τερματίζονται όταν η κατάσταση φόρτισης βρεθεί εκτός ορίων SOC_{min}, SOC_{max} .

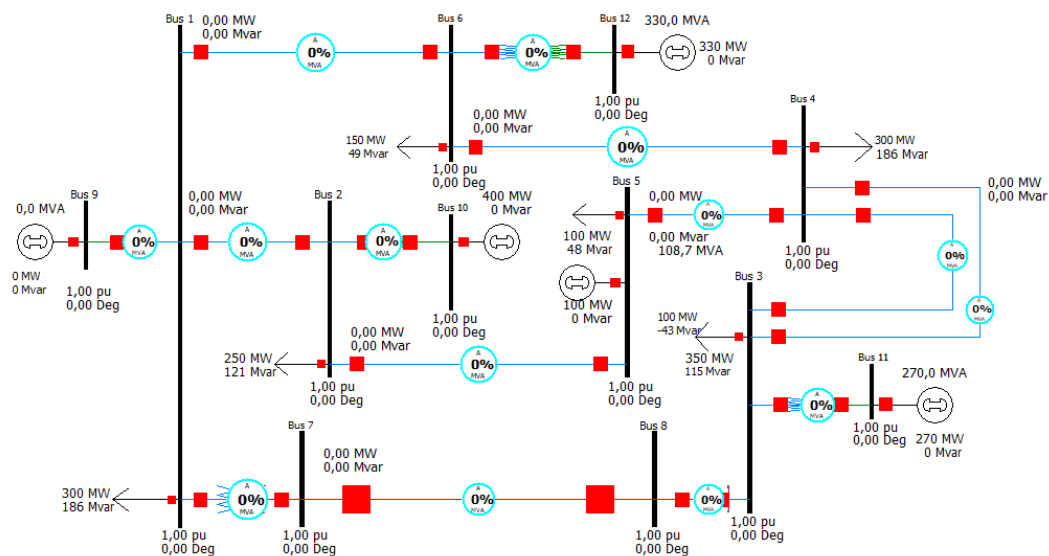
5.5 Προσομοίωση Συστήματος

Όπως αναφέρθηκε, το σύστημα προς εξέταση είναι το Generic 12- Bus System της IEEE. Το συγκεκριμένο σύστημα κρίνεται κατάλληλο για τον σκοπό της παρούσας εργασίας καθώς έχει χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο σε μελέτες που αφορούν την ενσωμάτωση παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Αποτελείται από:

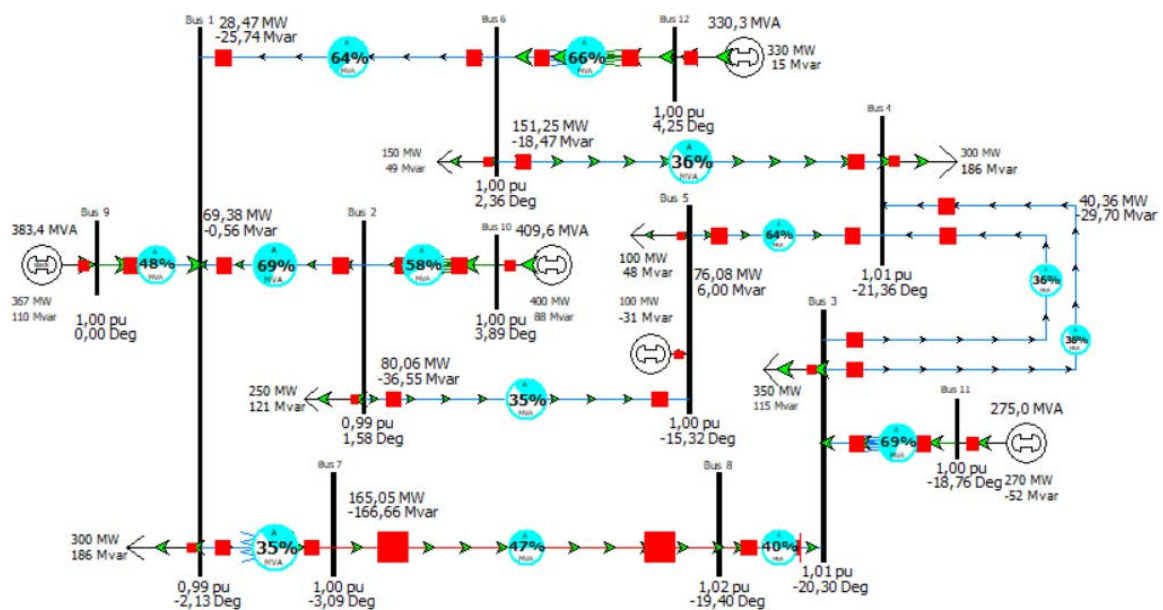
- 12 ζυγούς
- 3 συμβατικές γεννήτριες θερμικής παραγωγής
- 1 υδροηλεκτρικό σταθμό
- 1 αιολικό πάρκο
- 5 φορτία
- 6 μετασχηματιστές
- 7 γραμμές μεταφοράς

Αρχικά, επιχειρείται η εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, επιλύοντας το πρόβλημα της ανάλυσης ροής φορτίου. Έτσι, σε πρώτη φάση οι γεννήτριες και τα φορτία αντιμετωπίζονται ως συμβατικά και σταθερής ισχύος. Οι ονομαστικές τιμές των στοιχείων του συστήματος παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Πρέπει να σημειωθεί ότι ως δεδομένα βάσης θεωρούνται η ισχύς $S_{base}=100\text{MVA}$ και η τάση $V_{base}=13.8\text{kV}$ στην πλευρά των γεννητριών. Η αναπαράσταση του συστήματος στο περιβάλλον του λογισμικού PowerWorld Simulator φαίνεται στην Εικόνα 5.9, μετά την εισαγωγή των δεδομένων.



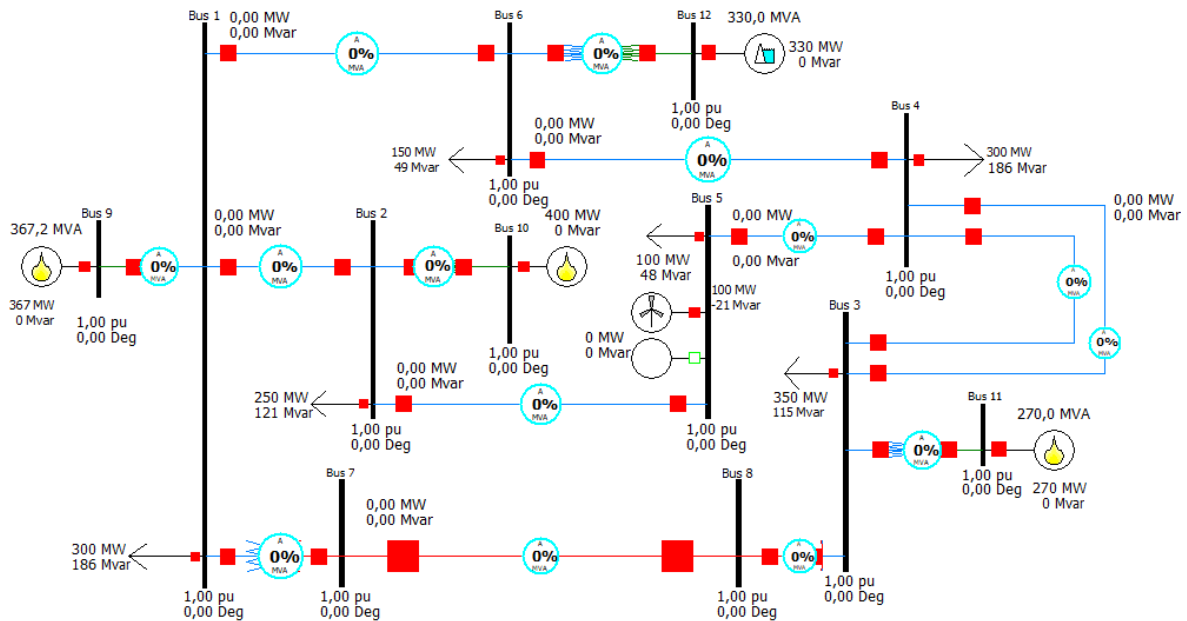
Εικόνα 5.9: Μοντελοποιημένο σύστημα 12 ζυγών στο PowerWorld Simulator

Για τη διεξαγωγή της Ανάλυσης Ροής Φορτίου επιλέγεται η μέθοδος Newton- Raphson. Στην Εικόνα 5.10 που παρατίθεται, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου. Συγκεκριμένα, αναγράφονται οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς κατά μέτρο και γωνία, οι ροές πραγματικής και αέργου ισχύος κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς και η παραγόμενη ισχύς από τις γεννήτριες. Τέλος, είναι ορατά όλα τα ποσοστά φόρτισης.



Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα Ανάλυσης Φορτίου

Η ενσωμάτωση των μονάδων παραγωγής γίνεται με την κατάλληλη μοντελοποίηση, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Στον ζυγό 5 τοποθετείται μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας για την αναπαράσταση της αμφίδρομης φόρτισης ενός συνόλου Η/Ο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11: Απεικόνιση Συστήματος μετά από την εισαγωγή του μοντέλου φόρτισης

5.6 Παραδοχές για την εξομοίωση της υπηρεσίας V2G

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, τα Η/Ο αποτελούν διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής όταν υποστηρίζουν τη διαδικασία V2G και μπορούν να παρέχουν μόνο ορισμένα kW. Η αξία τους για την ευστάθεια του δικτύου θα αναδειχθεί όταν συγκροτηθεί ένα μεγάλο σύνολο Η/Ο, που θα δημιουργεί έναν εικονικό σταθμό παραγωγής. Στην παρούσα εργασία, γίνεται η παραδοχή ότι ένα μεγάλο σύνολο Η/Ο συνδέεται ταυτόχρονα στο σύστημα και έχει την ικανότητα να προσφέρει μέχρι και 100 MW. Ακόμη, θεωρείται ότι όλα τα οχήματα έχουν τα ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και την ίδια κατάσταση φόρτισης στην αρχή της προσομοίωσης. Η στρατηγική ελέγχου που υλοποιείται είναι ο «Περιορισμένος Έλεγχος» καθώς ο πρωτεύων στόχος είναι η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος ενώ εξετάζεται εάν το ποσοστό φόρτισης διατηρείται σε ένα επιτρεπτό εύρος τιμών. Οι τιμές των μεγεθών που εισάγονται από τον χρήστη για την εξομοίωση της έξυπνης αμφίδρομης φόρτισης αναφέρονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Δεδομένα για την εξομοίωση της έξυπνης αμφίδρομης φόρτισης

Αρχική Κατάσταση Φόρτισης (SOC _{init})	0.5
Μέγιστη Κατάσταση Φόρτισης (SOC _{max})	0.8
Ελάχιστη Κατάσταση Φόρτισης (SOC _{min})	0.2
Χρόνος Πλήρους Φόρτισης (T)	3600 sec

5.7 Περιγραφή και Επίλυση Προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να αξιολογήσει την συνεισφορά της έξυπνης αμφίδρομης φόρτισης στην αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Σε αυτό το σημείο, ξεκινά η ενασχόληση με την μελέτη του δικτύου σε μεταβατικές καταστάσεις έτσι ώστε να εξεταστούν τα μεγέθη:

- A. Συχνότητα
- B. Τάση Ζυγών
- Γ. Κατάσταση Φόρτισης
- Δ. Πραγματική και Άεργος ισχύς μονάδας αποθήκευσης

Κάθε φορά η εξέταση των αποτελεσμάτων γίνεται με την βοήθεια των διαγραμμάτων του εκάστοτε μεγέθους συναρτήσει του χρόνου, που εξάγονται από το λογισμικό PowerWorld Simulator και τα αποτελέσματα συνοψίζονται σε αντίστοιχους πίνακες. Δομικά, γίνεται ο διαχωρισμός σε δύο περιπτώσεις:

- A. Απουσία μονάδας αποθήκευσης ενέργειας
- B. Παρουσία μονάδας αποθήκευσης ενέργειας

Ενώ τα λειτουργικά σενάρια που εξετάζονται υποκύπτουν στις κατηγορίες:

1. Μεταβολή στην παραγωγή από τις ΑΠΕ
2. Μεταβολή στη ζήτηση φορτίου

Σε κάθε περίπτωση εξετάζεται η δυνατότητα των διαφορετικών συστημάτων με διαφορετική ικανότητα ελέγχου droop να εκτελούν πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και να διατηρούν την ευστάθεια του συστήματος άλλοτε λειτουργώντας ως παραγωγοί (V2G), όταν υπάρχει έλλειμμα παραγωγής και άλλοτε ως φορτία όταν υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής (G2V).

Κεφάλαιο 6

Μελέτη μεταβατικών καταστάσεων

6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ερευνήθηκαν σενάρια που αφορούν τις μεταβολές που συμβαίνουν στη παραγωγή λόγω της στοχαστικής λειτουργίας των ΑΠΕ καθώς και της συνεχώς μεταβαλλόμενης ζήτησης. Συγκεκριμένα, ερευνώνται τα εξής σενάρια:

Σενάριο 1: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου

- Σενάριο 1.1: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% (10 MW)
- Σενάριο 1.2: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50% (50 MW)
- Σενάριο 1.3: Απομάκρυνση παραγωγής από το αιολικό πάρκο (100MW) με άνοιγμα των διακοπών

Σενάριο 2: Μείωση της Παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού

- Σενάριο 2.1: Μείωση της Παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% (33 MW)

Σενάριο 3: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στους ζυγούς φορτίων

- Σενάριο 3.1: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% (50 MW)
- Σενάριο 3.2: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% (175 MW)

Σενάριο 4: Μείωση της ζήτησης στα φορτία των ζυγών

- Σενάριο 4.1: Μείωση της ζήτησης στο φορτίο του ζυγού 4 κατά 10% (30 MW)
- Σενάριο 4.2: Μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% (50 MW)

Σενάριο 5: Αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου

- Σενάριο 5.1: Αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% (10 MW)

Τα Σενάρια 1, 2 και 3 στοχεύουν στην εξέταση της συμβολής της διαδικασίας V2G ενώ τα Σενάρια 4 και 5 της αντίστροφης διαδικασίας G2V, στην ευστάθεια του δικτύου. Τα σενάρια μελετώνται αναλυτικά παρακάτω εξετάζοντας τα διαγράμματα που παράγονται από το λογισμικό. Οι γραφικές παραστάσεις που μελετώνται είναι:

A. Συχνότητα σε Hz στον κατακόρυφο άξονα σε συνάρτηση με τον χρόνο σε δευτερόλεπτα στον οριζόντιο άξονα.

B. Τάση Ζυγών σε μονάδες per unit στον κατακόρυφο άξονα σε συνάρτηση με τον χρόνο σε δευτερόλεπτα στον οριζόντιο άξονα.

Γ. Κατάσταση φόρτισης σε μονάδες per unit στον κατακόρυφο άξονα σε συνάρτηση με τον χρόνο σε δευτερόλεπτα στον οριζόντιο άξονα.

Δ. Πραγματική ισχύς σε μονάδες MW στον κατακόρυφο άξονα σε συνάρτηση με τον χρόνο σε δευτερόλεπτα στον οριζόντιο άξονα. Άεργος ισχύς σε μονάδες MVAR στον κατακόρυφο άξονα σε συνάρτηση με τον χρόνο σε δευτερόλεπτα στον οριζόντιο άξονα.

Ακολουθεί η λεπτομερής ανάλυση των σεναρίων.

Σενάριο 1: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου (V2G)

Στο Σενάριο 1, εξετάζεται η μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου που βρίσκεται στον ζυγό 5. Η ανάλυση περιλαμβάνει διαφορετικές τιμές μείωσης της παραγωγής προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στη συχνότητα και την τάση του συστήματος.

Παράλληλα αξιολογείται η ικανότητα της λειτουργίας V2G (Vehicle-to-Grid) να αποκαταστήσει την ευστάθεια του συστήματος για τα διαφορετικά επίπεδα αυτής της μεταβολής. Η είσοδος της διαταραχής γίνεται τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$, ώστε να μελετηθεί η δυναμική απόκριση του συστήματος στην προκύπτουσα αλλαγή.

Σενάριο 1.1: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% (10 MW)

A. Συχνότητα

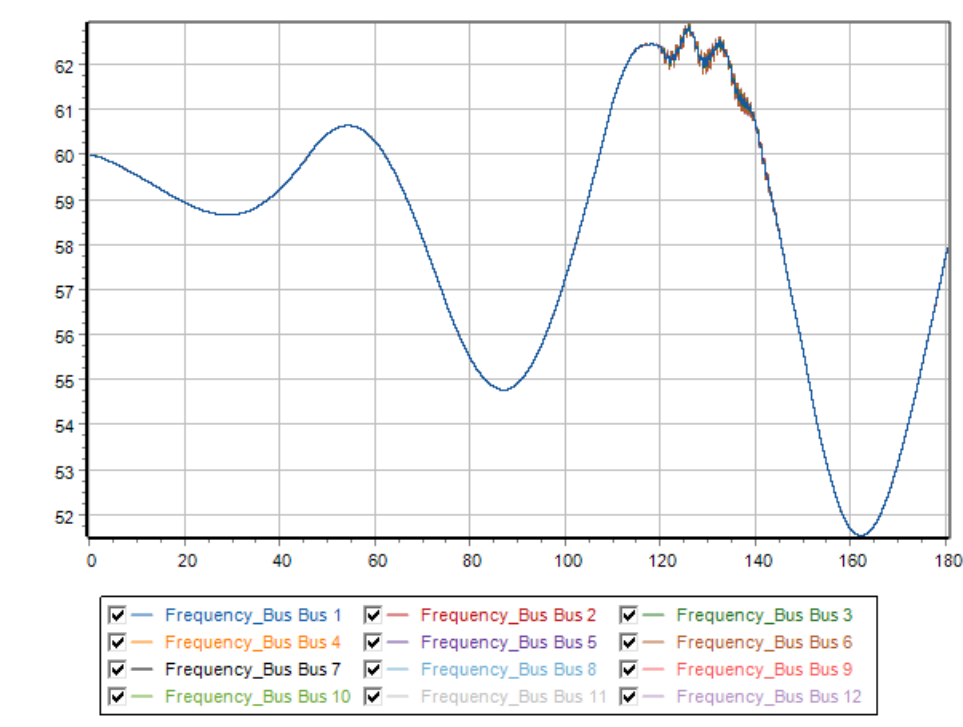
Μετά την είσοδο της διαταραχής, παρατηρείται σημαντική πτώση της συχνότητας, γεγονός που αντανακλά την αντίδραση του συστήματος στη μείωση της παραγωγής. Η συχνότητα εμφανίζει μεγάλες ταλαντώσεις, υποδηλώνοντας την προσπάθεια των ρυθμιστών στροφών των μονάδων παραγωγής να επαναφέρουν την παραγωγή σε σταθερή κατάσταση. Ωστόσο, η προσπάθεια αυτή φαίνεται να αποτυγχάνει οδηγώντας σε ταλάντωση με συνεχώς αυξανόμενο πλάτος οδηγώντας το σύστημα σε αστάθεια. Η Εικόνα 6.1 δείχνει τη μεταβολή της συχνότητας μετά την είσοδο της διαταραχής χωρίς την διαδικασία V2G.

Με την ενεργοποίηση της υπηρεσίας V2G (Vehicle-to-Grid), η συχνότητα παρουσιάζει μικρή πτώση αμέσως μετά την είσοδο της διαταραχής. Η συμβολή της V2G βοηθά στην

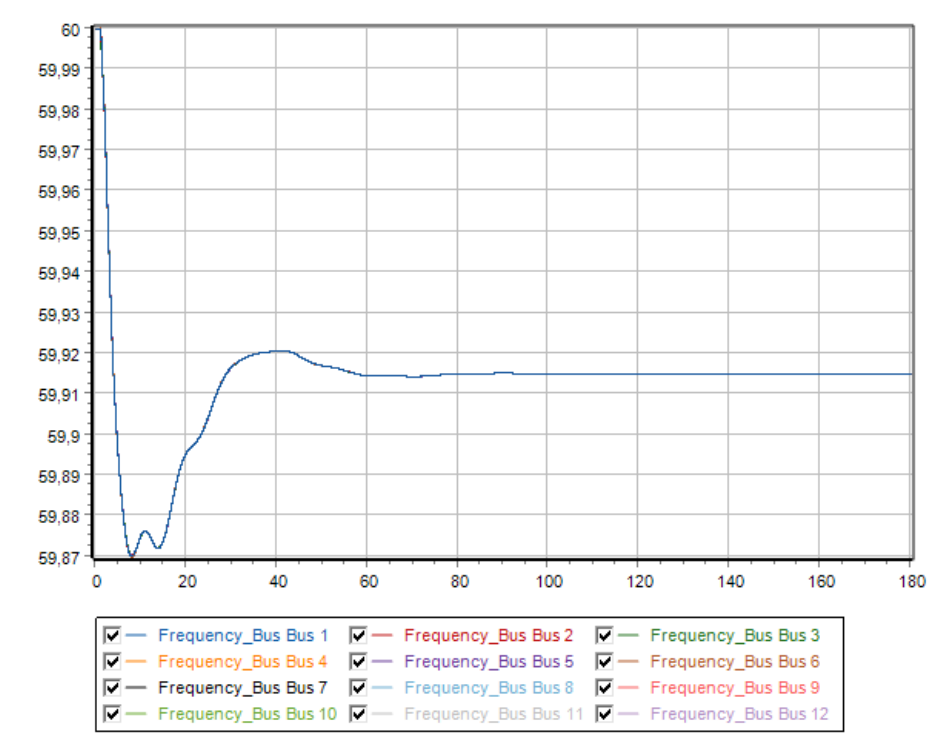
αποκατάσταση της συχνότητας, διατηρώντας όμως ένα μόνιμο σφάλμα. Οι Εικόνες 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 και 6.6 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας για τιμή dur 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Το μέγεθος αυτού του σφάλματος λοιπόν, εξαρτάται από τον συντελεστή Dur της στρατηγικής ελέγχου. Οι τιμές των αντίστοιχων μόνιμων σφαλμάτων φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Με την αύξηση του συντελεστή Dur , το σφάλμα στη συχνότητα μειώνεται, αλλά συνοδεύεται από περισσότερες ταλαντώσεις. Παρά την αρχική αυξημένη ένταση των ταλαντώσεων, αυτές σταδιακά αποσβένουν και τελικά συγκλίνουν σε μια σταθερή τιμή.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 1.1

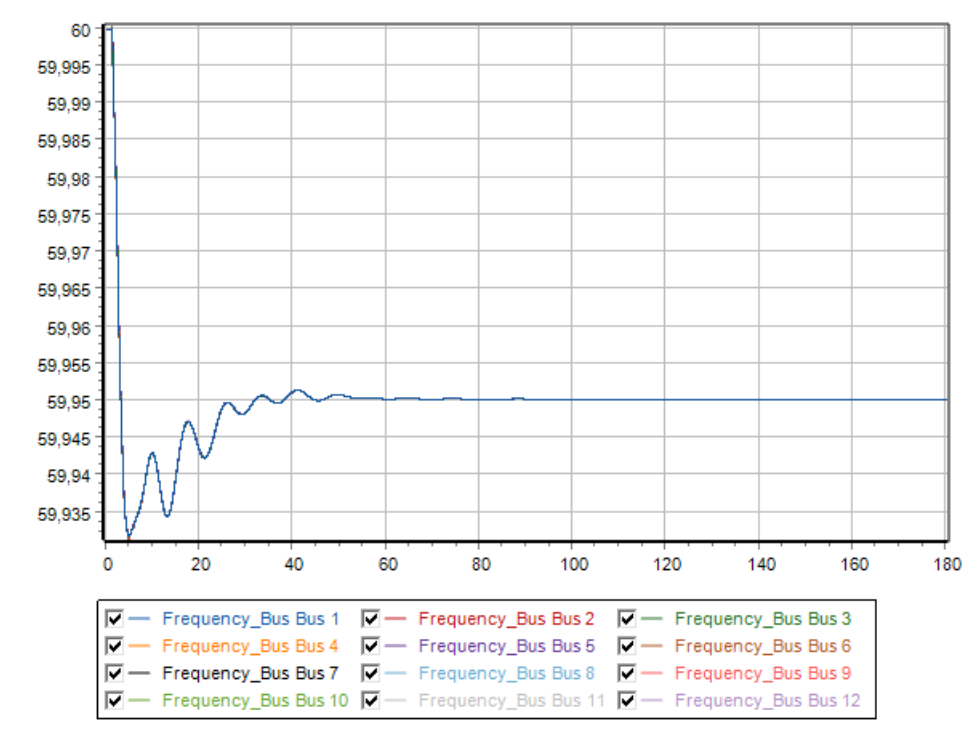
Συντελεστή ς Dur (pu)	50	100	200	300	400
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	0.085	0.05	0.027	0.019	0.014



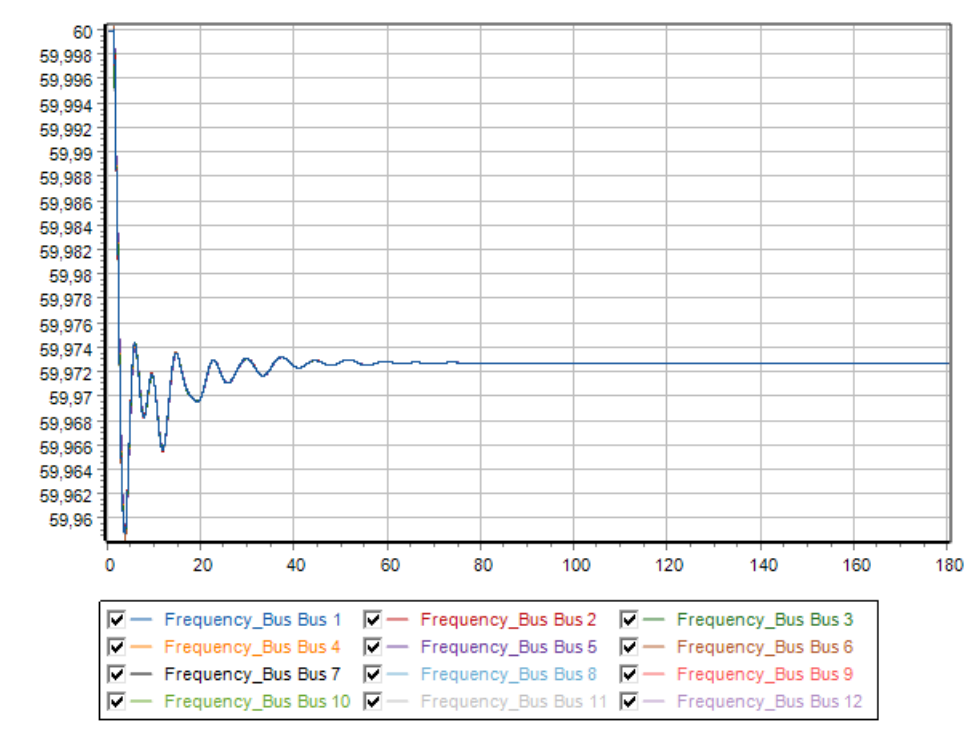
Εικόνα 6.1: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, απουσία V2G



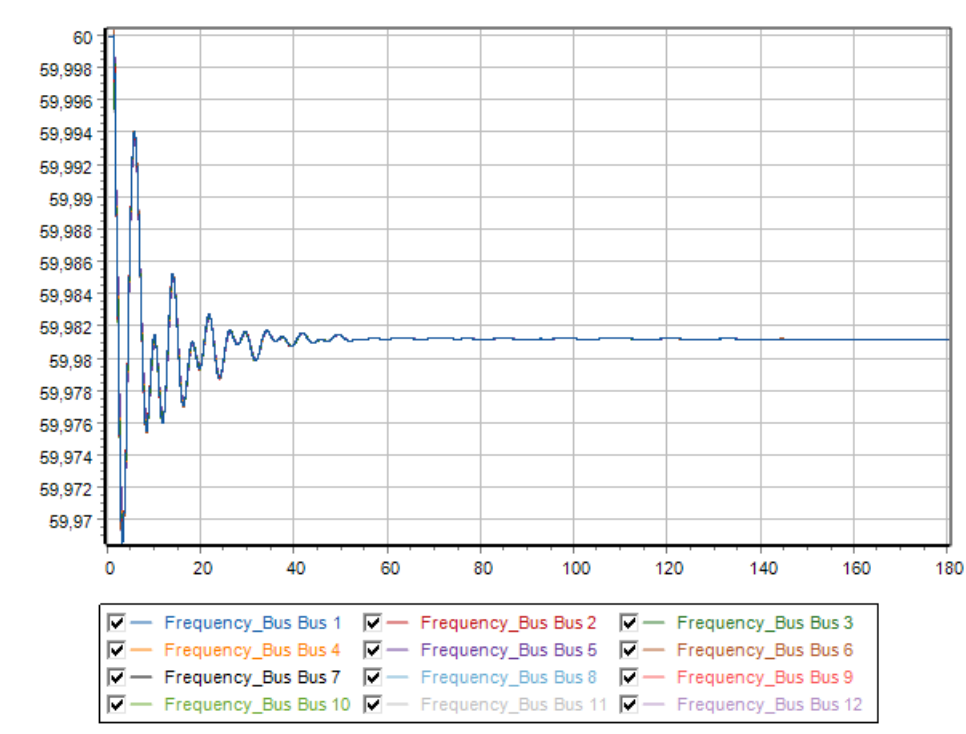
Εικόνα 6.2: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 50$



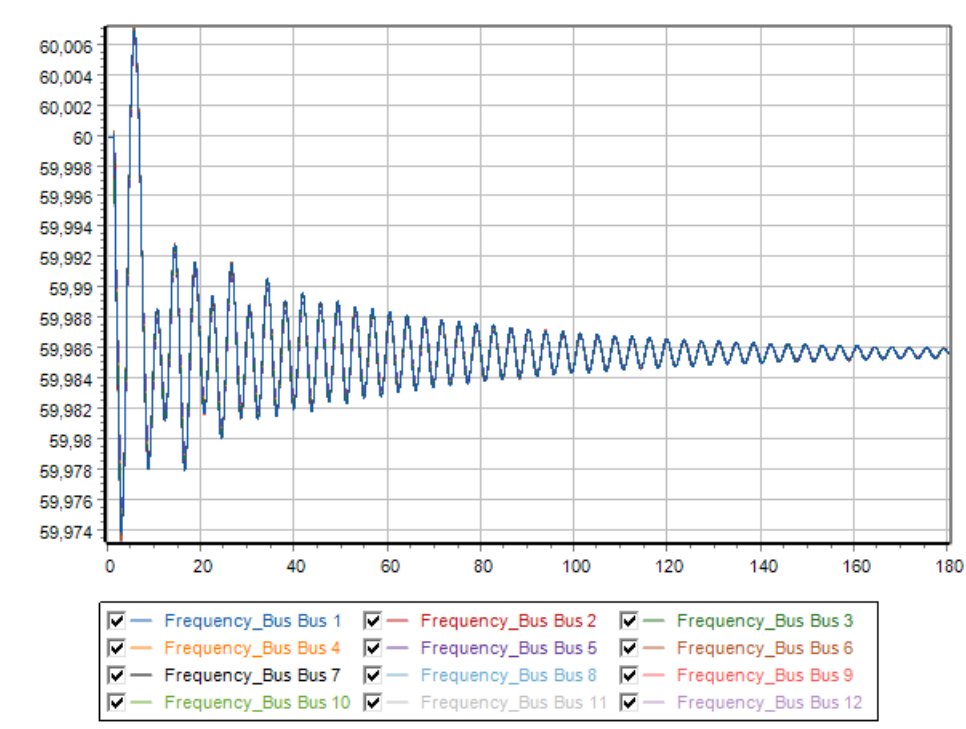
Εικόνα 6.3: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 100$



Εικόνα 6.4: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 200$



Εικόνα 6.5: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dur} = 300$

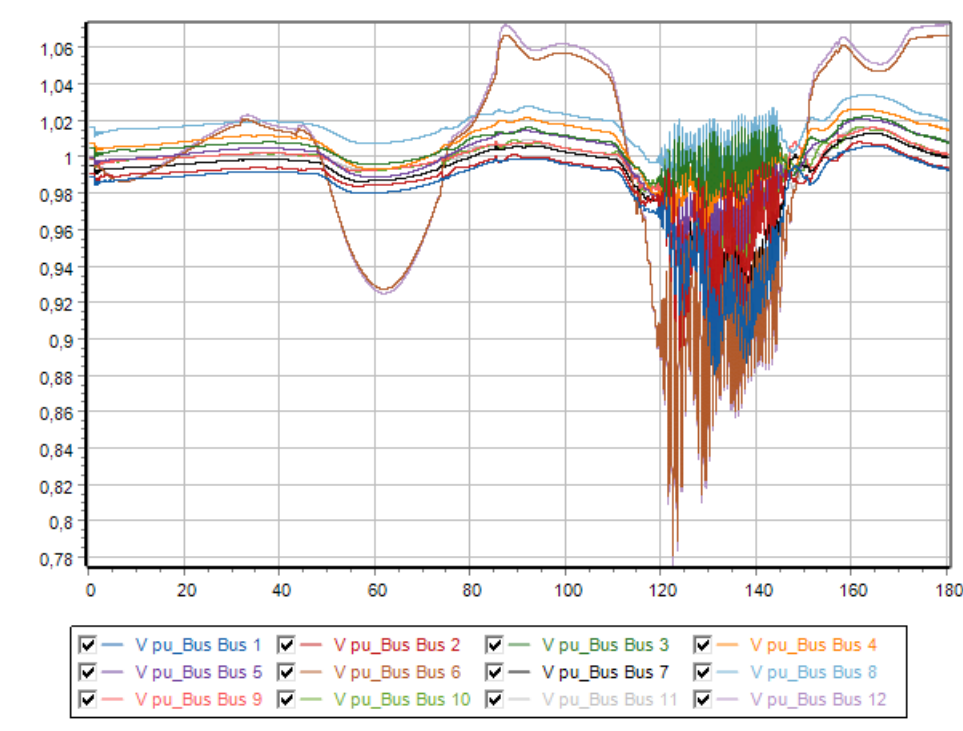


Εικόνα 6.6: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $\text{dur} = 400$

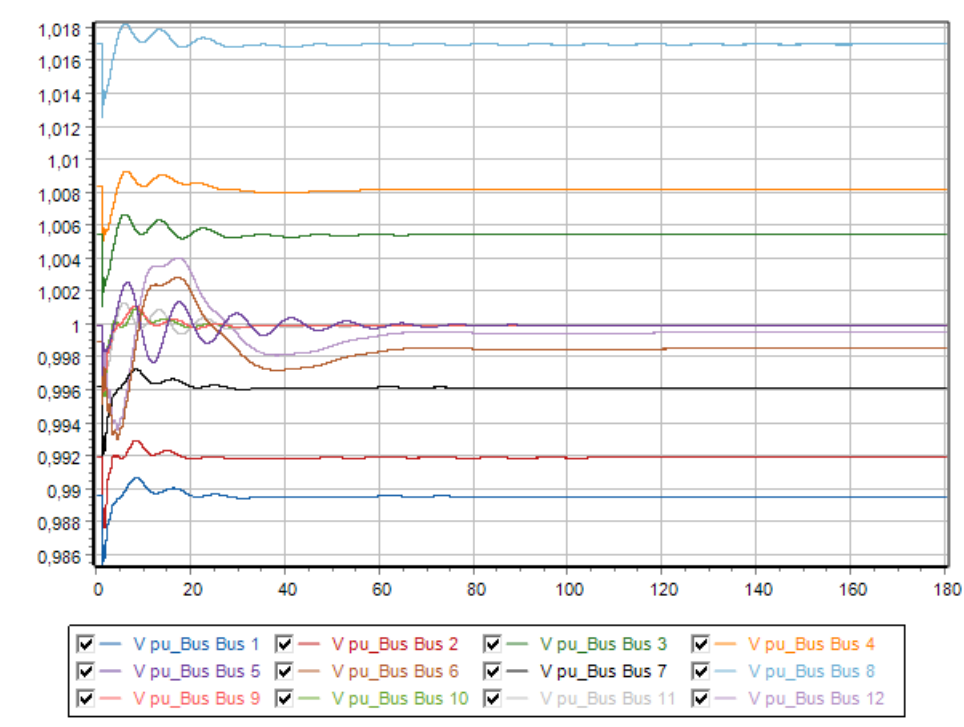
B. Τάση

Η εισαγωγή της διαταραχής επηρεάζει επίσης τις τάσεις στους ζυγούς του συστήματος. Τη στιγμή της εισαγωγής της διαταραχής παρατηρείται μια στιγμιαία πτώση στην τάση των ζυγών, η οποία προσωρινά σταθεροποιείται σε αποδεκτά επίπεδα. Ωστόσο, στη συνέχεια η τάση εμφανίζει έντονες ταλαντώσεις, υποδεικνύοντας την αστάθεια του συστήματος. Η Εικόνα 6.7 απεικονίζει τη συμπεριφορά των τάσεων στη διαταραχή, χωρίς την υπηρεσία V2G.

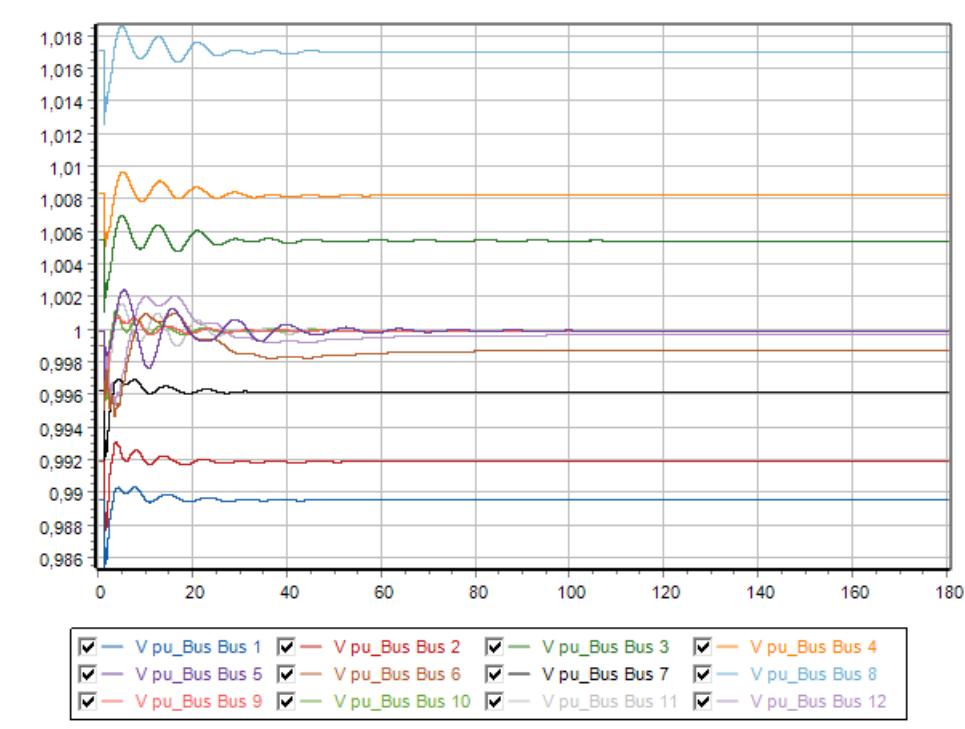
Με τη συνεισφορά της υπηρεσίας V2G, παρατηρείται ότι, ενώ η τάση παρουσιάζει επίσης μια μικρής κλίμακας πτώση αμέσως μετά την είσοδο της διαταραχής, επανέρχεται ταχέως στην αρχική της τιμή και σταθεροποιείται για ολόκληρο τον χρόνο της προσομοίωσης, διασφαλίζοντας την ευστάθεια του συστήματος. Η αποκατάσταση της τάσης συντελείται ακόμη και με μικρότερες τιμές του συντελεστή D_{up} . Η σταδιακή αύξηση του συντελεστή εμφανίζει μικρής κλίμακας φθίνουσες ταλαντώσεις. Οι Εικόνες 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 και 6.12 παρουσιάζουν τη μεταβολή των τάσεων για τιμές D_{up} 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.



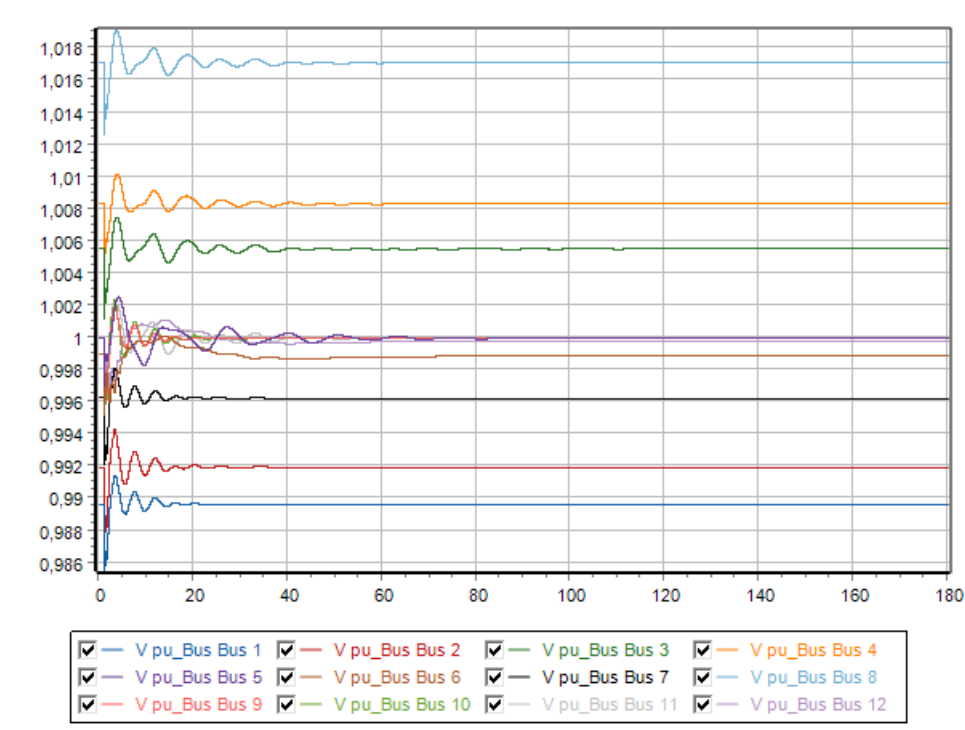
Εικόνα 6.7: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, απουσία V2G



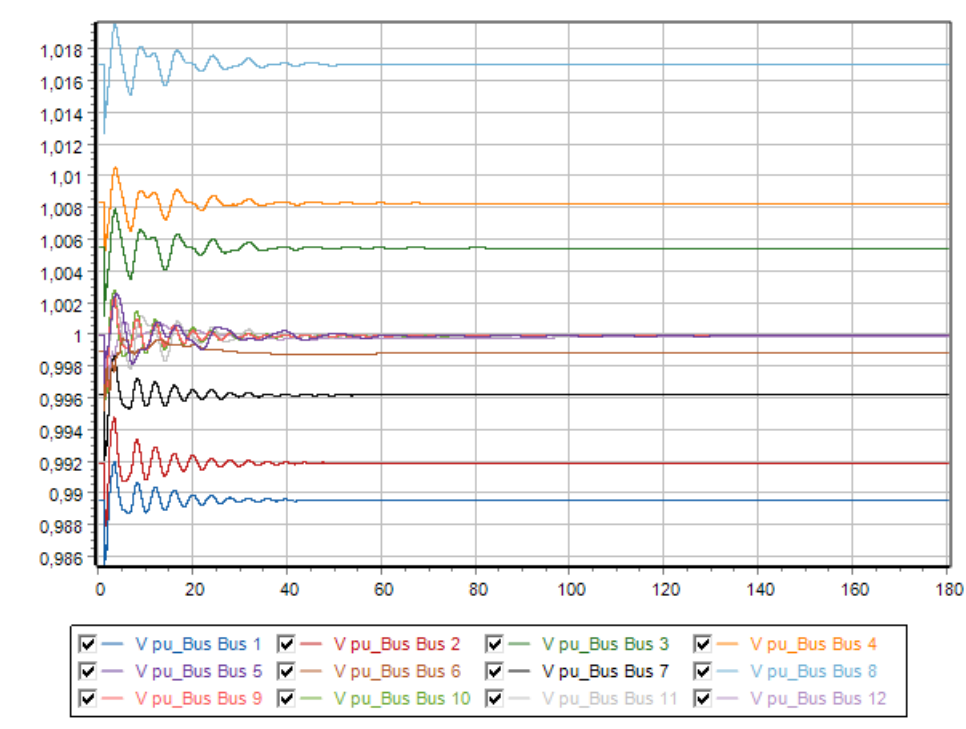
Εικόνα 6.8: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur=50$



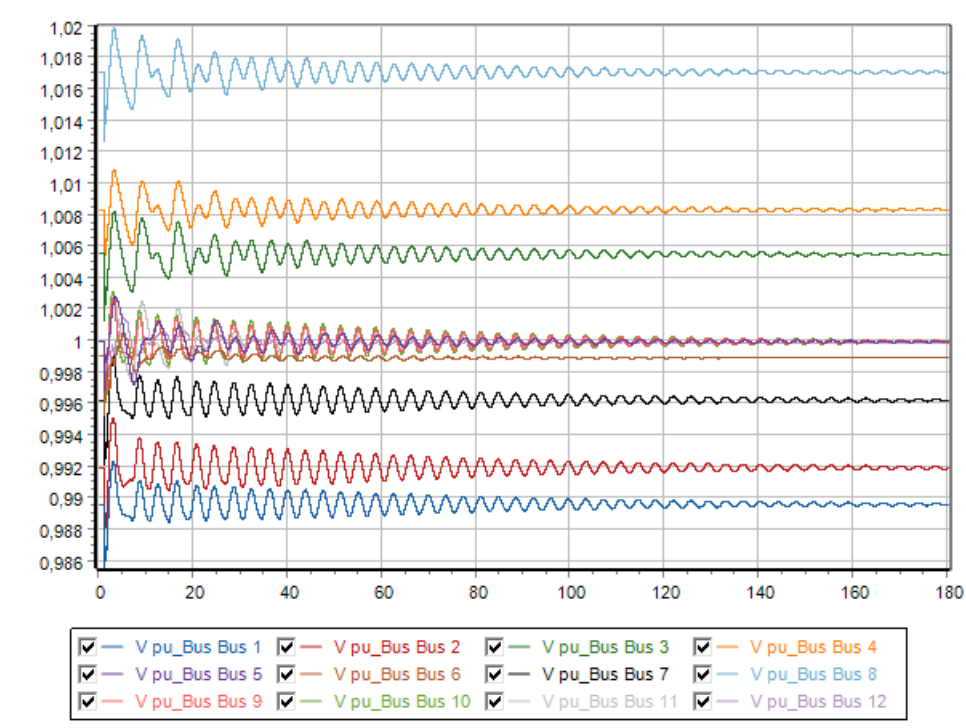
Εικόνα 6.9: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur=100$



Εικόνα 6.10: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur=200$



Εικόνα 6.11: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur=300$



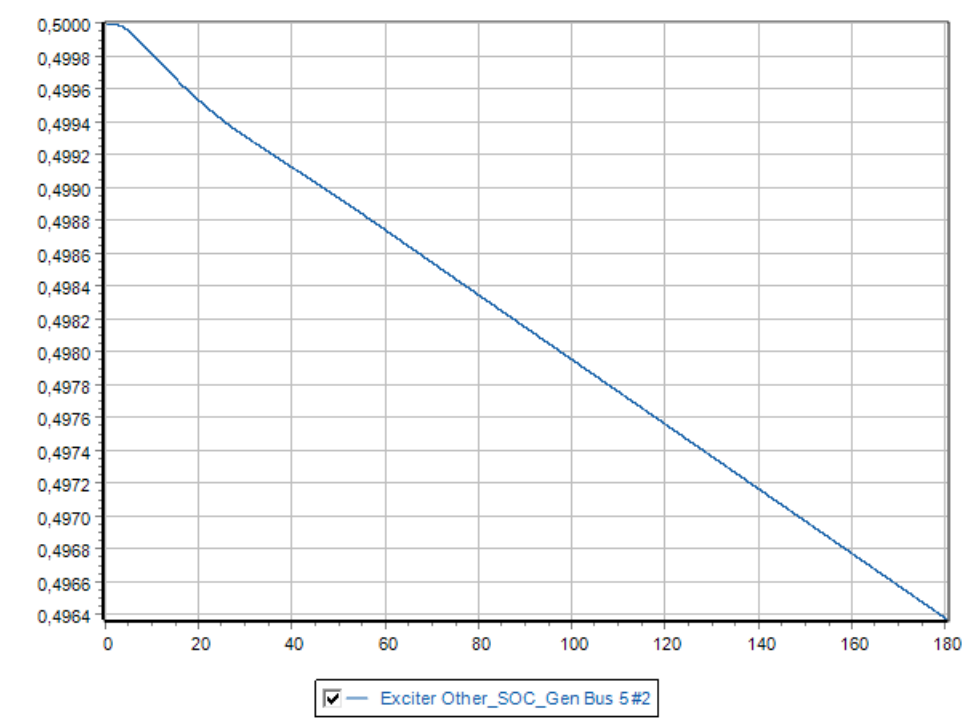
Εικόνα 6.12: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, παρουσία V2G με $dur=400$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

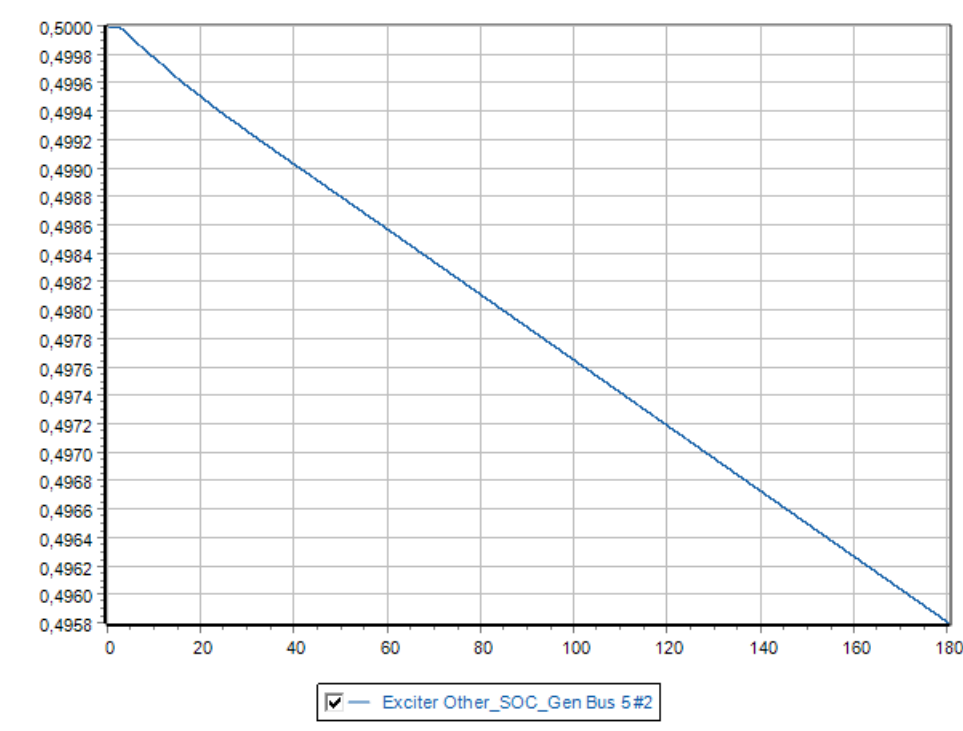
Η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης (State of Charge, SoC) παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση με την αύξηση του συντελεστή Dup, όπως είναι αναμενόμενο (Πίνακας 6.2). Αυτό συμβαίνει επειδή ένας υψηλότερος Dup επιτρέπει μεγαλύτερη συνεισφορά της υπηρεσίας V2G στην αποκατάσταση της συχνότητας και της τάσης του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται περισσότερη ενέργεια από τις μπαταρίες των οχημάτων, οδηγώντας σε μεγαλύτερη μείωση της κατάστασης φόρτισης. Η μείωση της κατάστασης φόρτισης είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αποκατάσταση της συχνότητας γίνεται εντός δευτερολέπτων, ενώ η πλήρης φόρτιση των μπαταριών απαιτεί μία ώρα. Ο χρόνος πλήρους φόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο που απαιτείται για την αποκατάσταση της συχνότητας, επομένως η ενέργεια που αντλείται από τις μπαταρίες είναι περιορισμένη και δεν επηρεάζει ουσιαστικά την κατάσταση φόρτισης των οχημάτων. Στον Πίνακα 6.2 συνοψίζονται οι μεταβολές της κατάστασης φόρτισης και απεικονίζονται στις Εικόνες 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 και 6.17 για τιμές Dup 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 1.1.

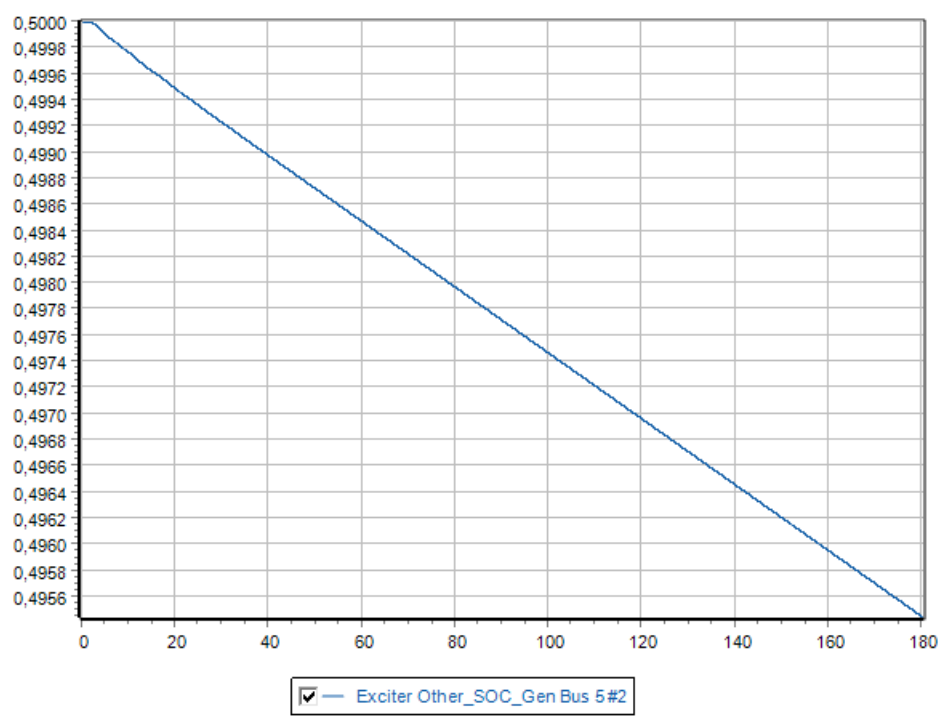
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400
Μεταβολή Κατάστασης Φόρτισης ΔSOC (%)	-0.36	-0.42	-0.46	-0.47	-0.48



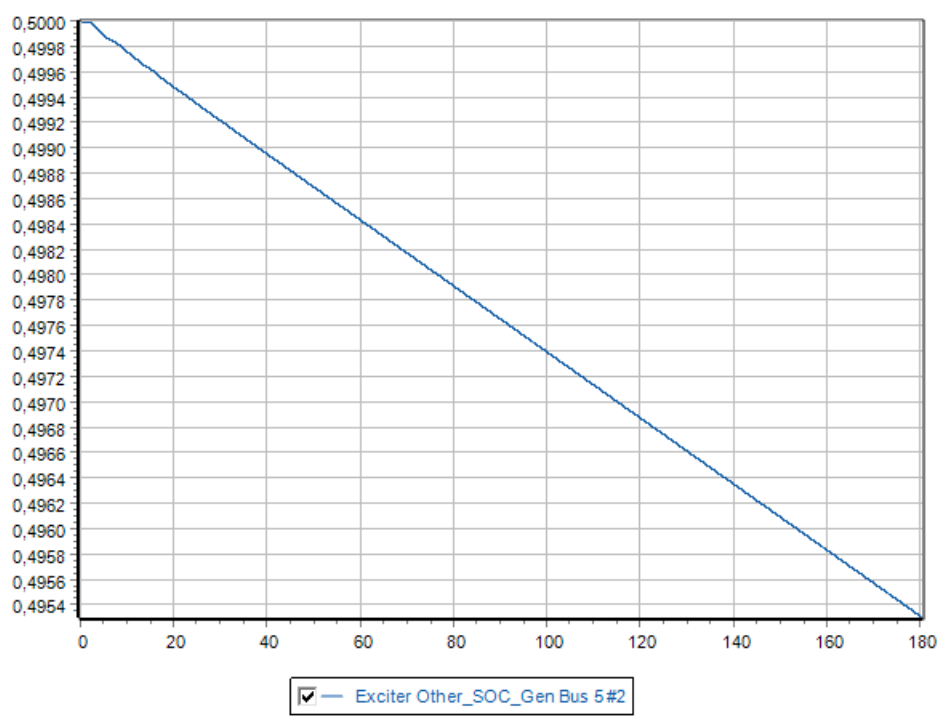
Εικόνα 6.13: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=50$



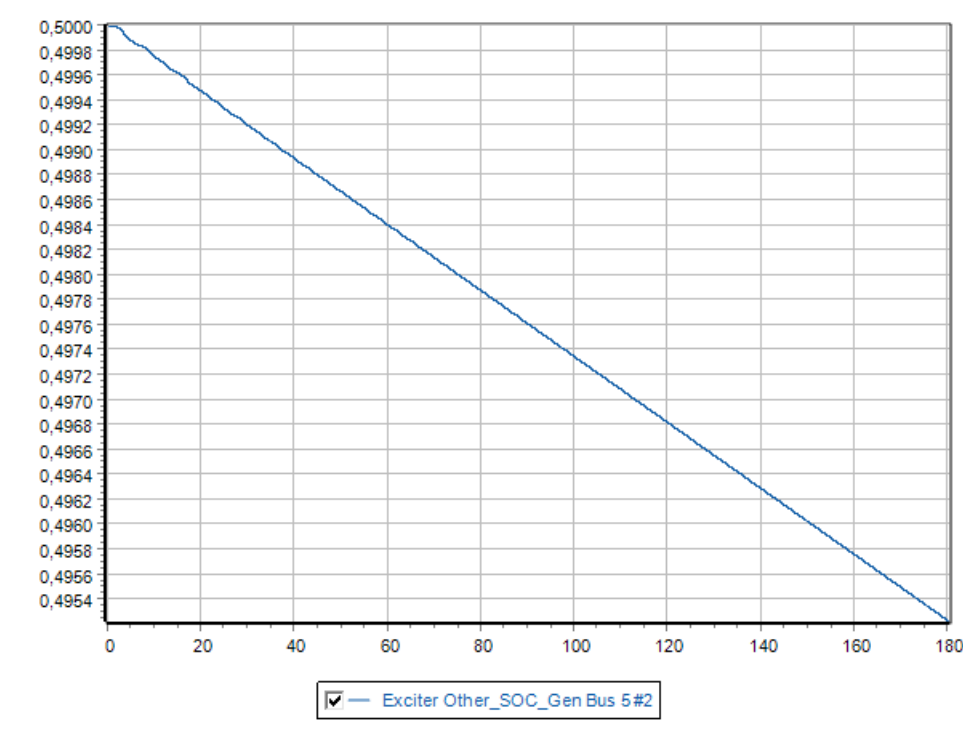
Εικόνα 6.14: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=100$



Εικόνα 6.15: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=200$



Εικόνα 6.16: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=300$



Εικόνα 6.17: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dup=400$

Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

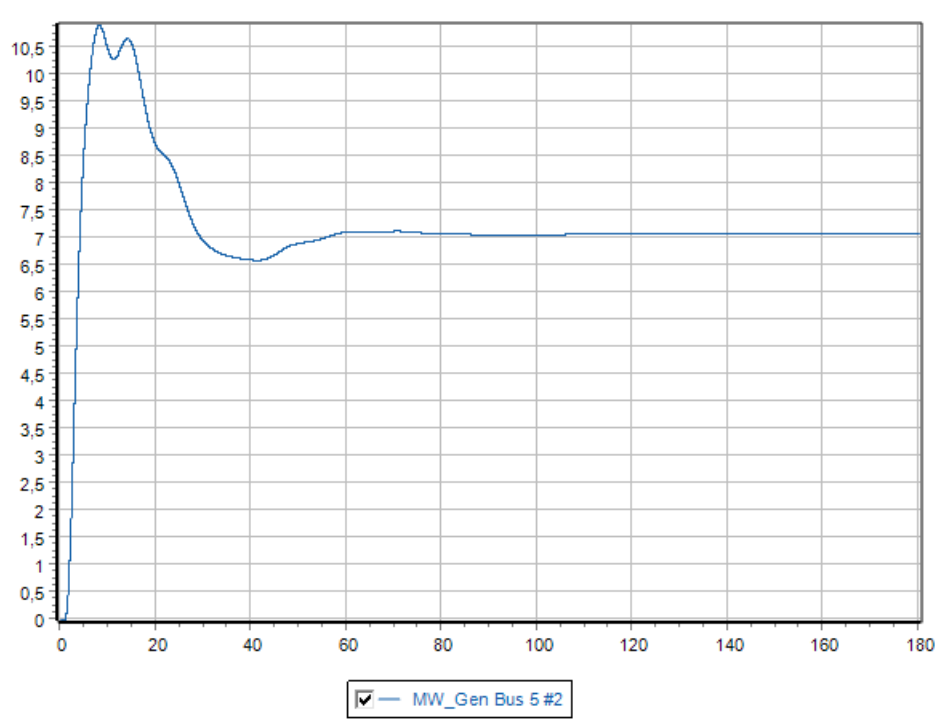
Στην αρχή του γραφήματος, που απεικονίζει την ενεργό ισχύ συναρτήσει του χρόνου στην έξοδο της μονάδας αποθήκευσης, παρατηρείται έντονη ταλάντωση στην ισχύ. Αυτό οφείλεται στην αρχική απόκριση των οχημάτων στη μεταβολή, με το σύστημα να προσπαθεί να σταθεροποιηθεί καθώς τα οχήματα αρχίζουν να εγγέουν ισχύ. Μετά από μερικά δευτερόλεπτα, η έξοδος σταθεροποιείται, υποδεικνύοντας ότι η απόκριση του συστήματος V2G έχει επιτύχει και η ισχύς που εγγέεται έχει σταθεροποιηθεί σε ένα επίπεδο που συμβάλλει στην αποκατάσταση της συχνότητας του συστήματος. Διαπιστώνεται ότι με την κατάλληλη επιλογή του συντελεστή Dup , η απόκριση της ισχύος βελτιώνεται αριθμητικά, πλησιάζοντας την πλήρη αποκατάσταση της μείωσης παραγωγής. Στις Εικόνες 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις πραγματικής ισχύος της διαδικασίας για Dup 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 6.3 συνοψίζονται οι τελικές τιμές ενεργού ισχύος της μονάδας για τις τιμές Dup 50, 100, 200, 300 στις οποίες ισορροπεί στον χρόνο παρατήρησης.

Στη γραφική παράσταση της άεργου ισχύος συναρτήσει του χρόνου, παρατηρείται επίσης έντονη ταλάντωση στην αρχή του γραφήματος. Οι Εικόνες 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 και 6.27 απεικονίζουν τη μεταβολή της άεργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας για Dup 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Αυτές οι ταλαντώσεις

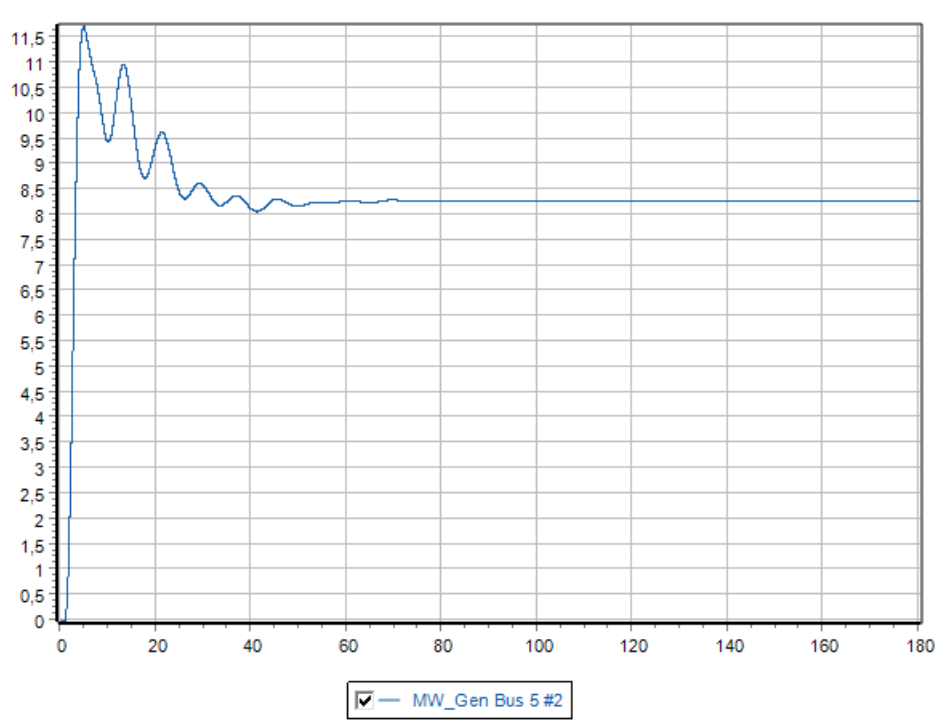
αντανακλούν την προσπάθεια του συστήματος να εξισορροπήσει τις αλλαγές στην ενεργό ισχύ και να σταθεροποιήσει την τάση. Τελικά, η άεργη ισχύς σταθεροποιείται, δείχνοντας ότι το σύστημα V2G έχει πετύχει τη σταθεροποίηση και στην άεργη ισχύ, η οποία ρύθμιζε το μέγεθος της τάσης. Ο Πίνακας 6.3 συνοψίζει τις τιμές ισορροπίας για την ενεργό και άεργο ισχύ για την εκάστοτε τιμή του συντελεστή Dup που δοκιμάστηκε.

*Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 1.1*

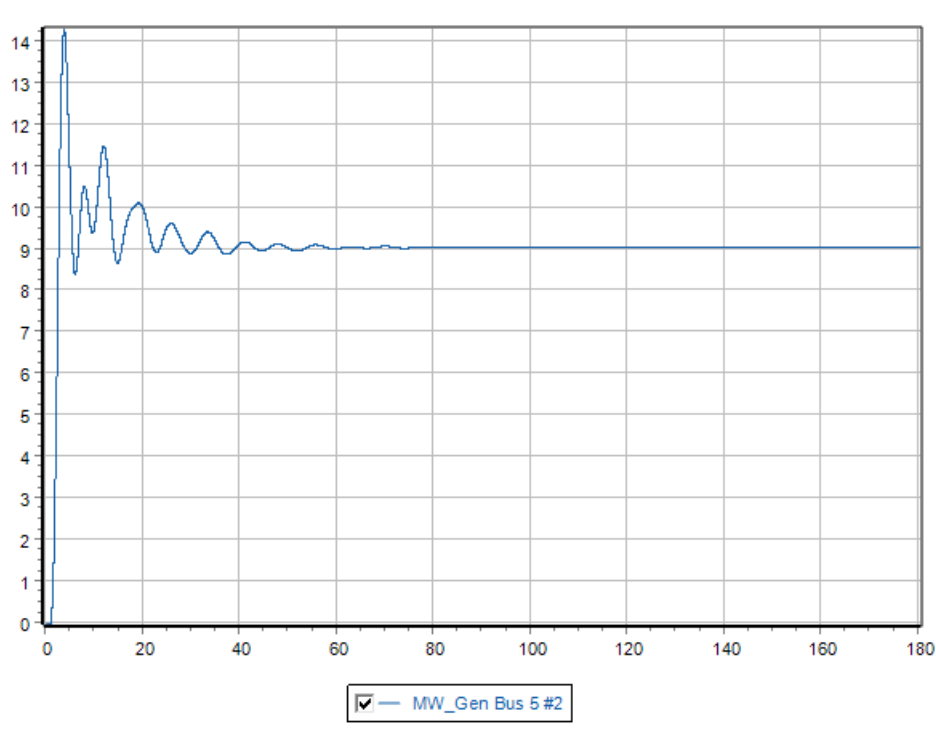
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400
Πραγματική Ισχύς (MW)	7	8.25	9	9.25	9.495
Άεργος Ισχύς (MVAR)	-16.3	-16.5	-16.6	-16.7	-16.68



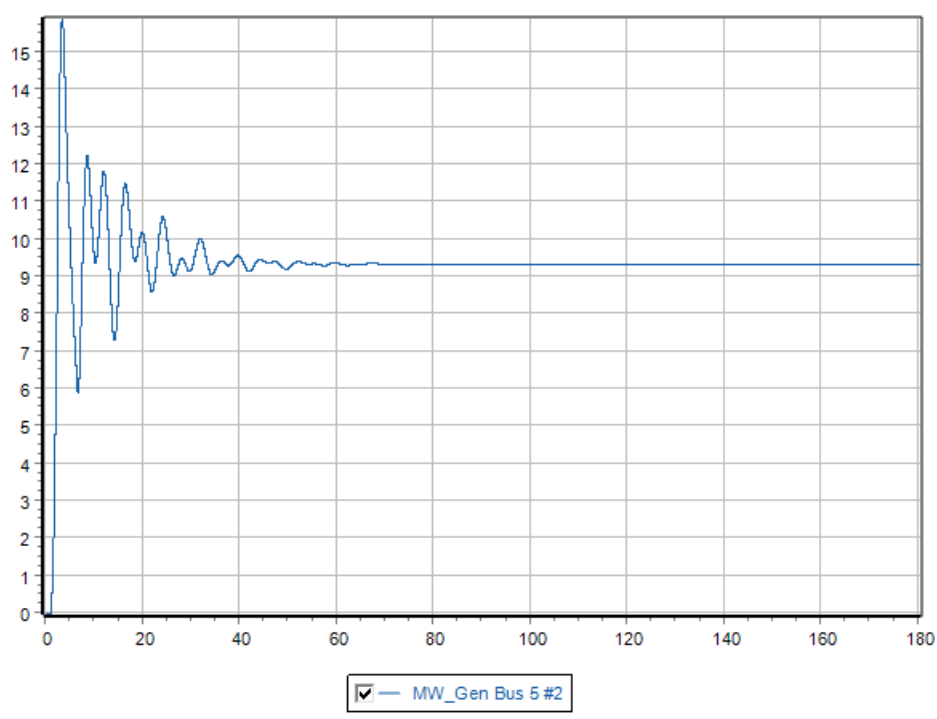
Εικόνα 6.18: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με dup=50



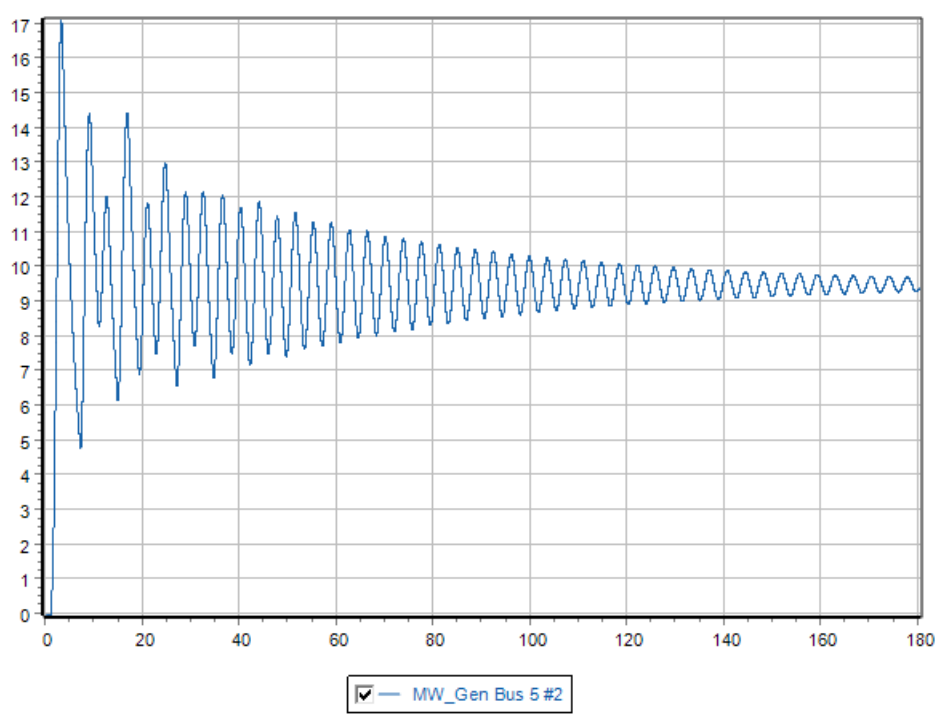
Εικόνα 6. 19: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=100$



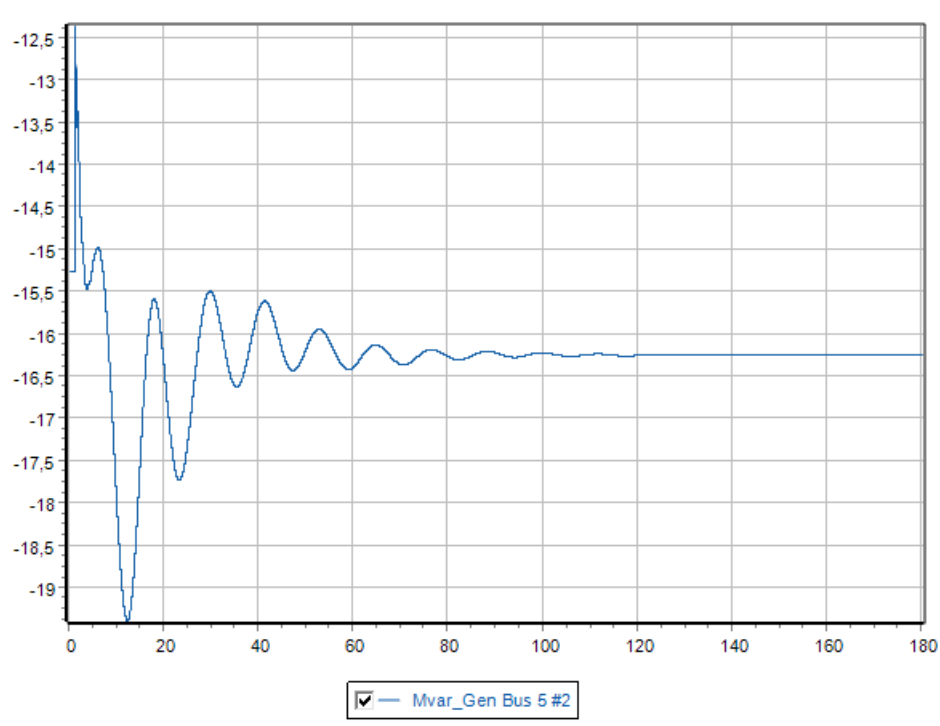
Εικόνα 6.20: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=200$



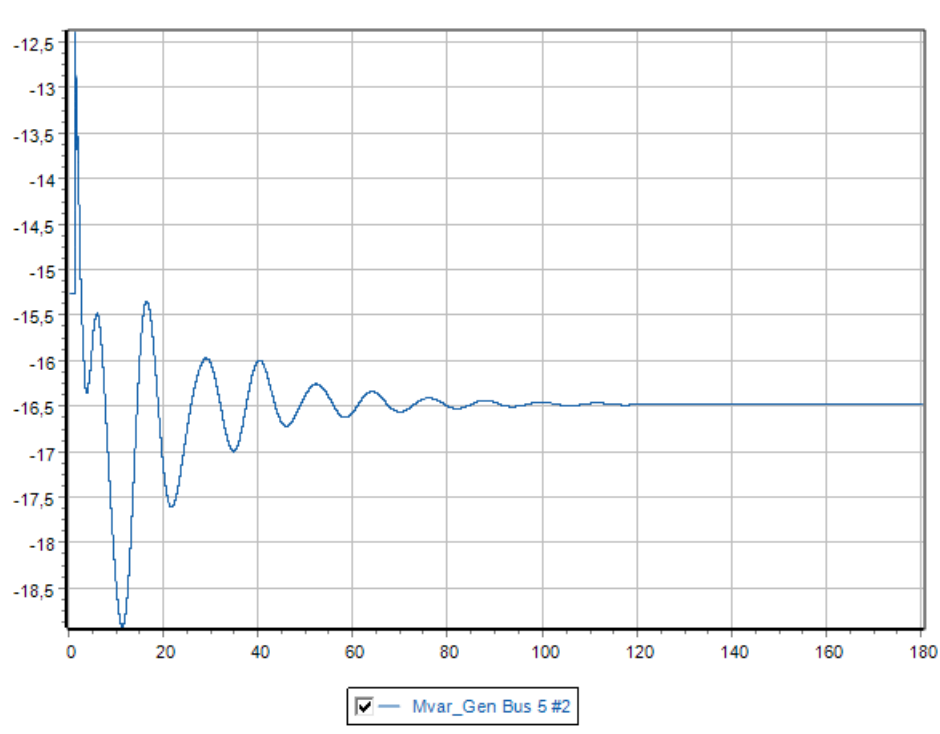
Εικόνα 6.21: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=300$



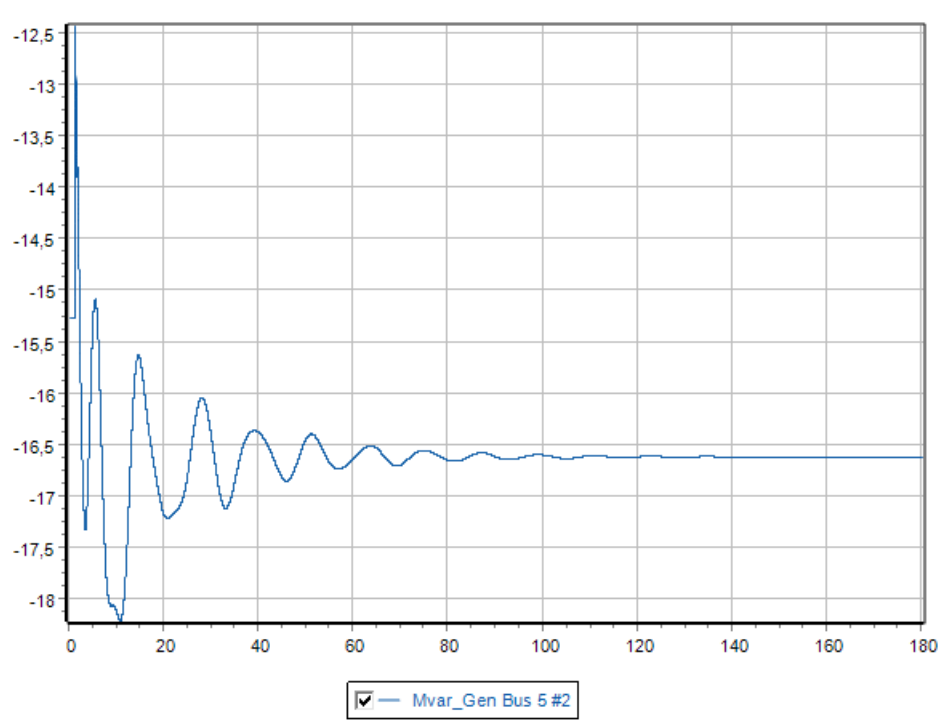
Εικόνα 6.22: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=400$



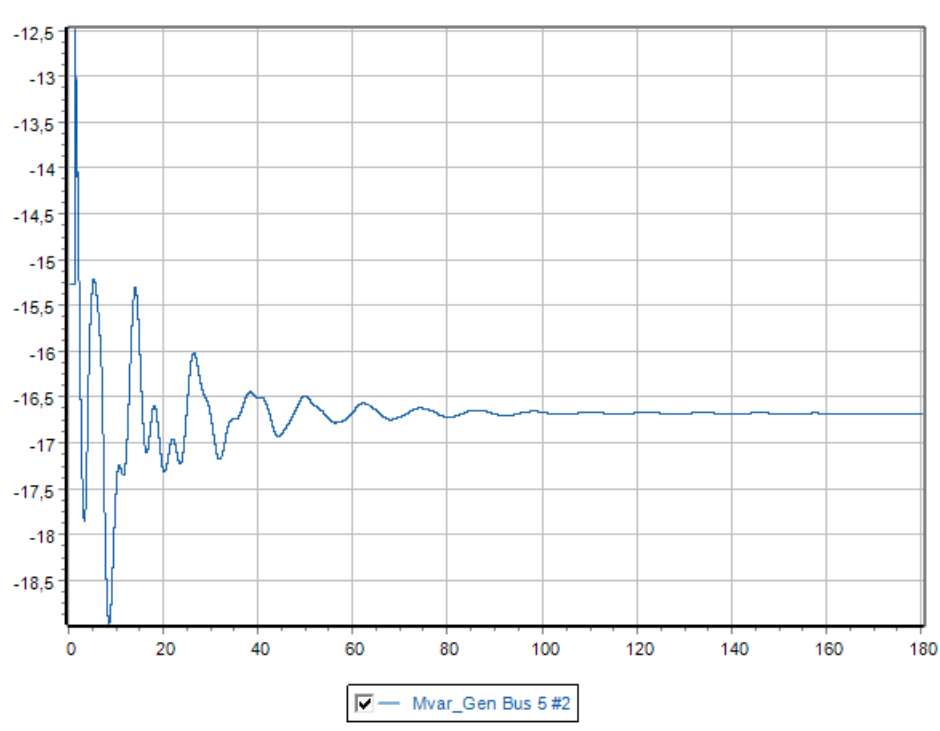
Εικόνα 6.23: Άεργη ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dip=50$



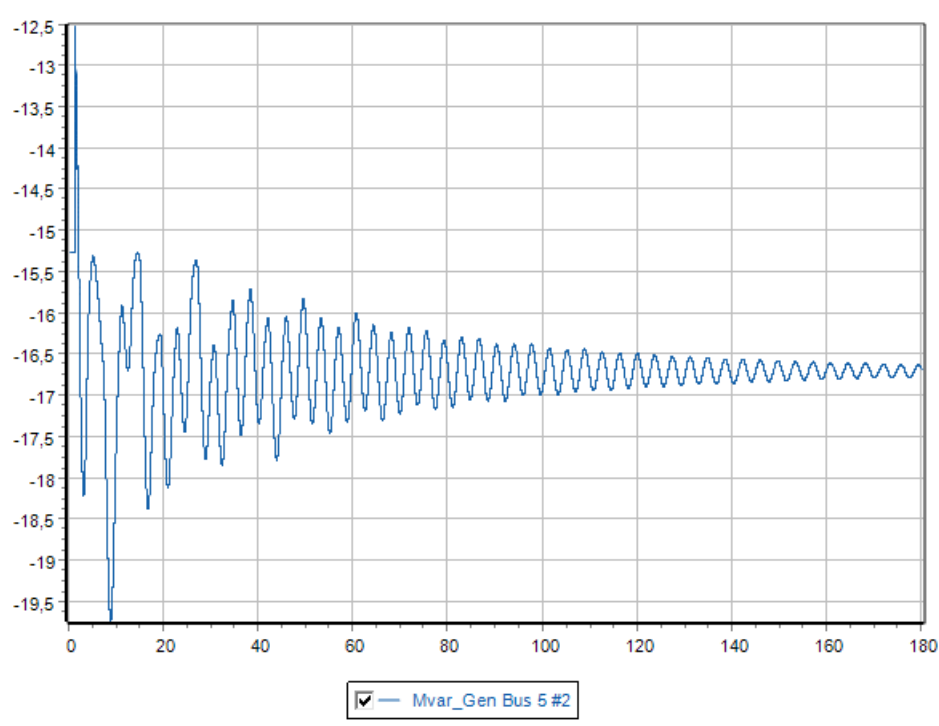
Εικόνα 6.24: Άεργη ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dip=100$



Εικόνα 6.25: Άεργη ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dur}=200$



Εικόνα 6.26: Άεργη ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $\text{dur}=300$



Εικόνα 6.27: Άεργη ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, με $dur=400$

Σενάριο 1.2: Μείωση της Παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50% (50 MW)

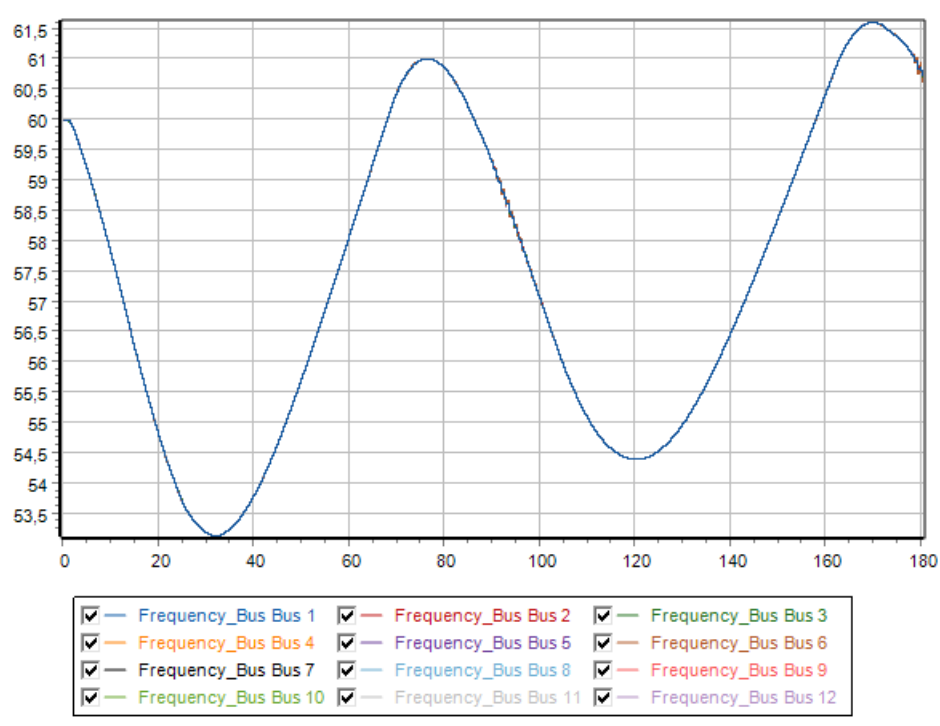
Α. Συχνότητα

Στο παρόν σενάριο, εξετάζεται μια μεγαλύτερη μείωση στην παραγωγή του αιολικού πάρκου. Στην περίπτωση αυτή, η συχνότητα παρουσιάζει σημαντικότερη πτώση μετά την είσοδο της διαταραχής, η οποία δεν αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά από την αντίδραση των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών. Η Εικόνα 6.28 απεικονίζει τη μεταβολή της συχνότητας μετά την είσοδο της διαταραχής, απουσία του συστήματος V2G.

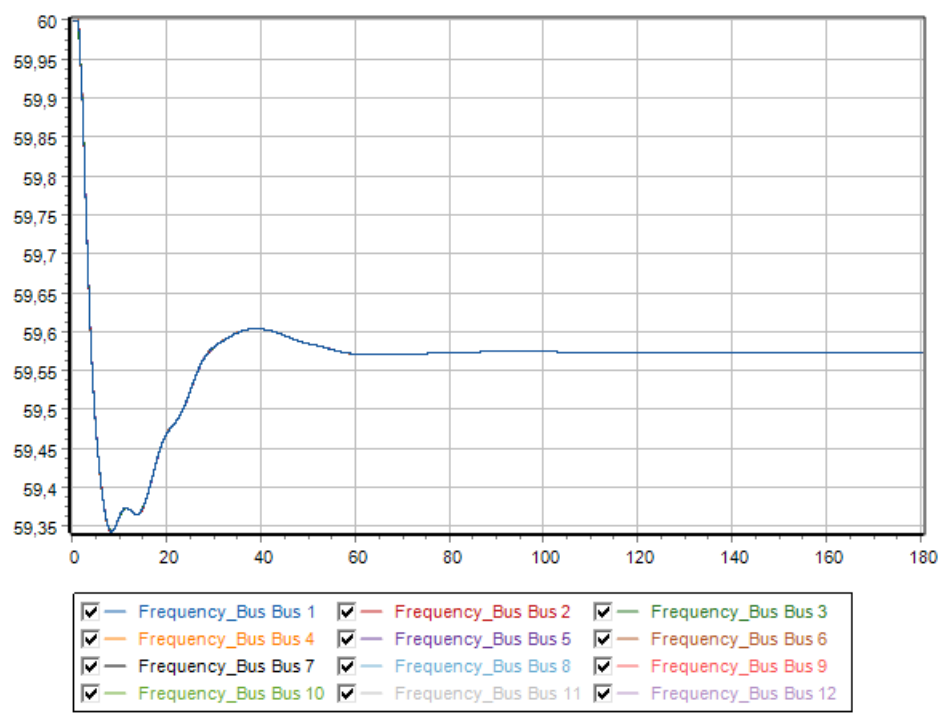
Με τη συμβολή της υπηρεσίας V2G, επιτυγχάνεται η πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας, διατηρώντας ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Οι Εικόνες 6.29, 6.30, 6.31, 6.32 και 6.33 απεικονίζουν την απόκριση της συχνότητας για τιμές Dur 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Η αντίστροφη σχέση μεταξύ του συντελεστή Dur και του σφάλματος συχνότητας παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση, επιβεβαιώνοντας ότι η αύξηση του Dur οδηγεί σε μικρότερο σφάλμα συχνότητας και σε αποσβεννύμενες ταλαντώσεις μικρού πλάτους. Το σφάλμα είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το Σενάριο 1.1, λόγω της μεγαλύτερης αρχικής μείωσης στην παραγωγή. Ο Πίνακας 6.4 συνοψίζει τα αποτελέσματα του μόνιμου σφάλματος συχνότητας για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή Dur .

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 1.2

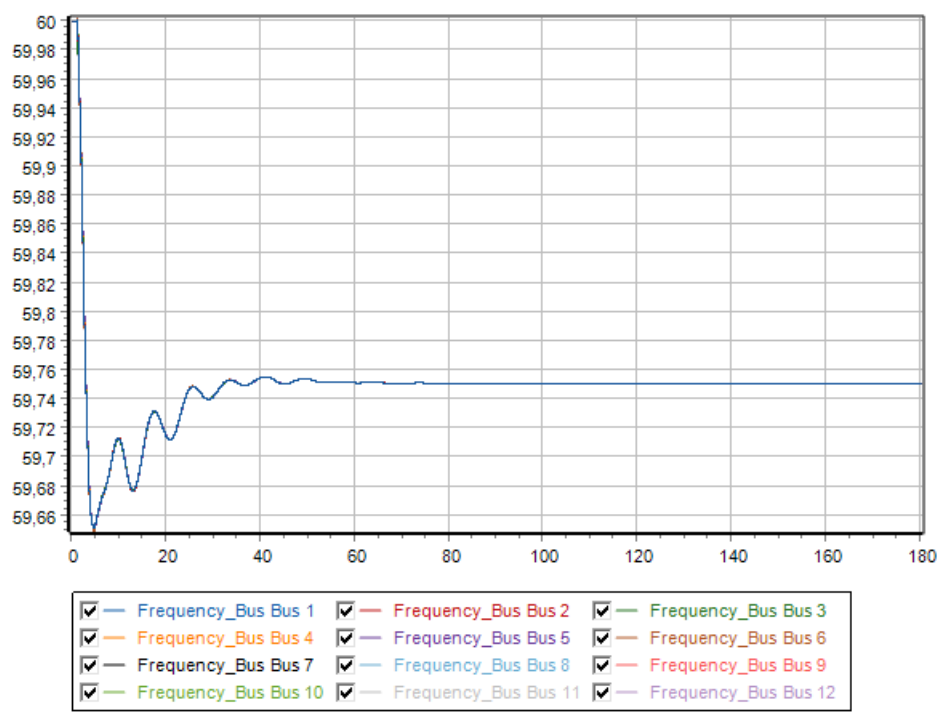
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	0.424	0.248	0.136	0.093	0.071



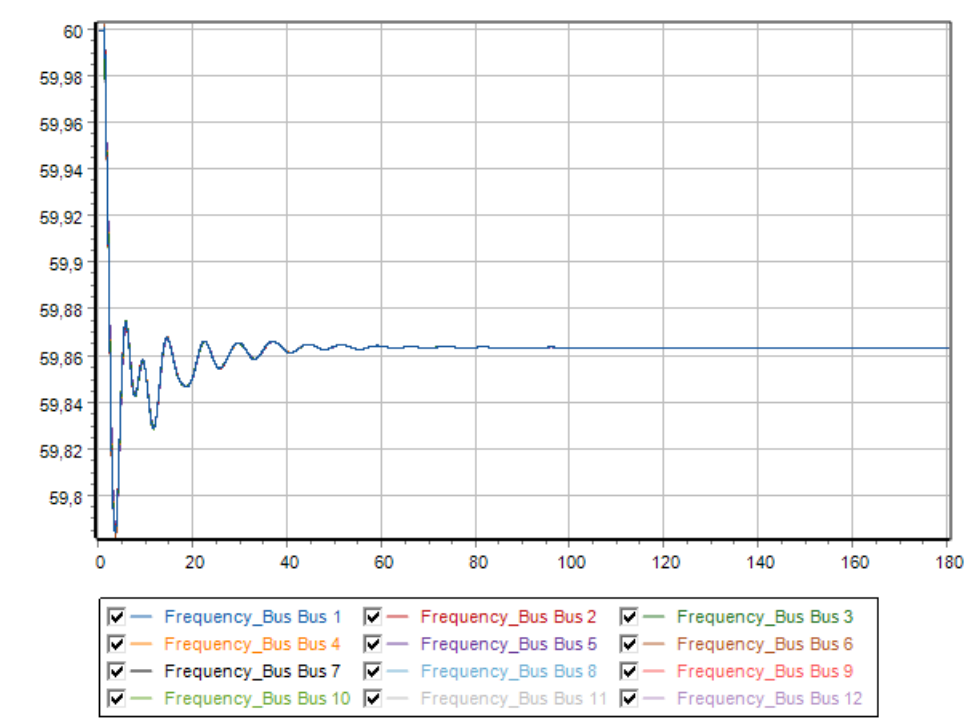
Εικόνα 6.28: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, απουσία V2G



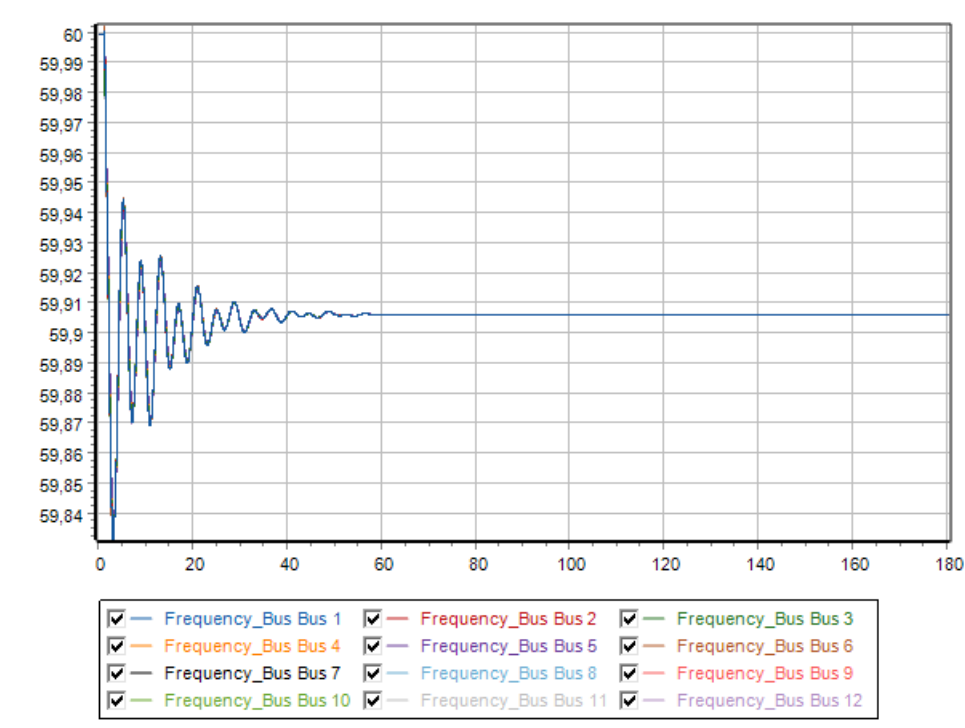
Εικόνα 6.29: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=50$



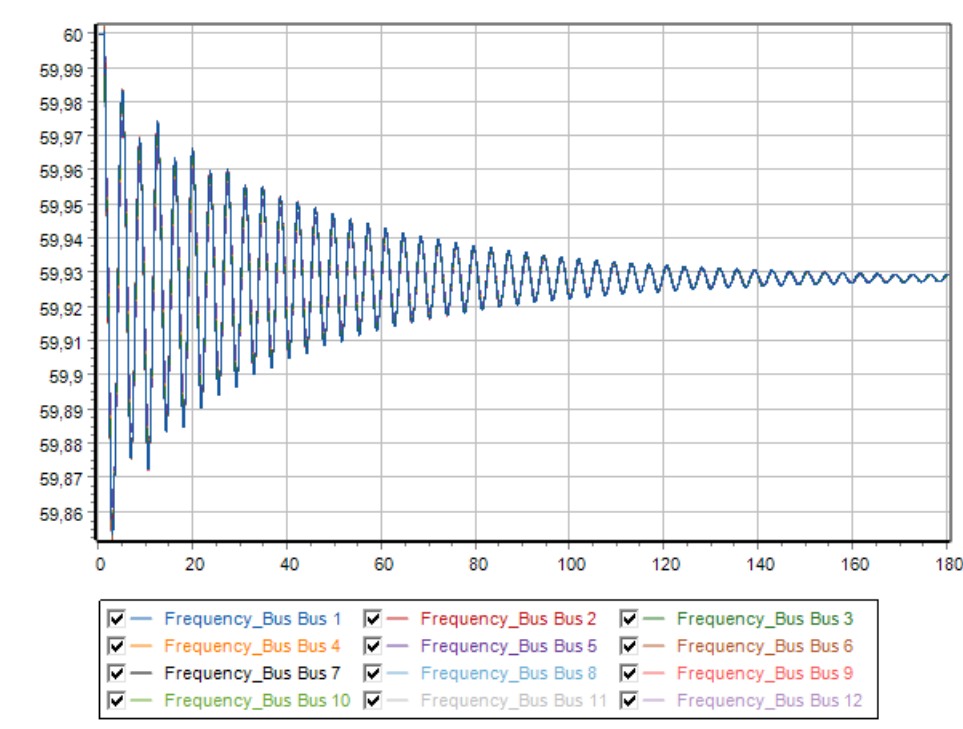
Εικόνα 6.30: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=100$



Εικόνα 6.31: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=200$



Εικόνα 6.32: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=300$

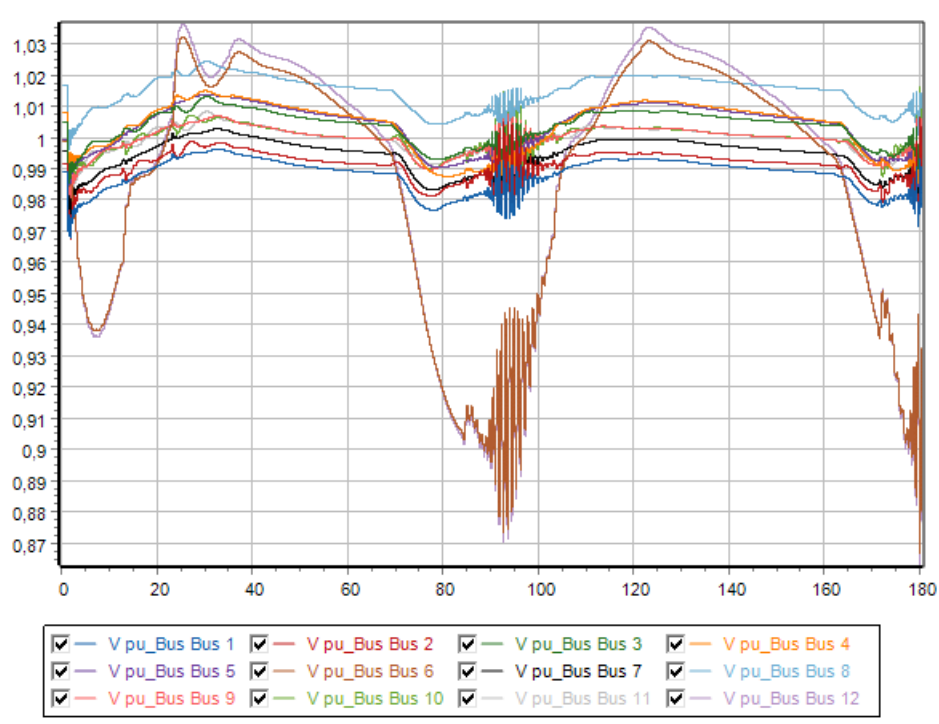


Εικόνα 6.33: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=400$

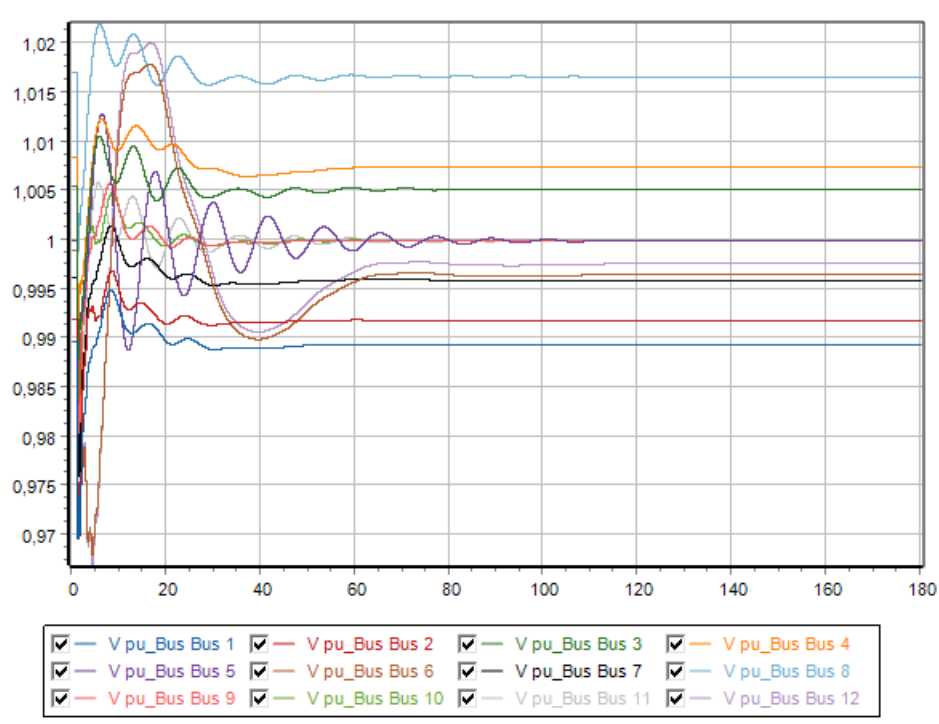
B. Τάση

Αμέσως μετά την είσοδο της διαταραχής, παρατηρείται μια στιγμιαία μεγαλύτερη πτώση στην τάση των ζυγών, συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο. Αυτή η πτώση προκύπτει λόγω της μεγαλύτερης μείωσης της ενεργού παραγωγής από το αιολικό πάρκο. Η τάση παρουσιάζει έντονες ταλαντώσεις καθώς το σύστημα προσπαθεί να εξισορροπήσει τις αλλαγές και να σταθεροποιηθεί. Η Εικόνα 6.34 απεικονίζει τη μεταβολή των τάσεων στους ζυγούς μετά την είσοδο της διαταραχής, απουσία της διαδικασίας V2G.

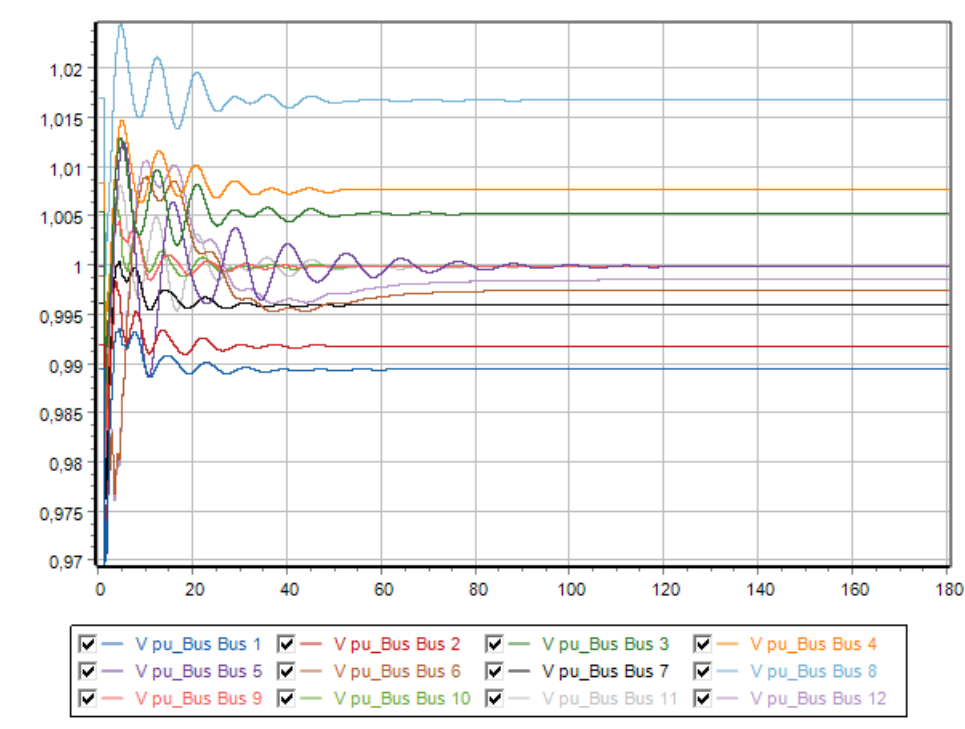
Με την ενεργοποίηση της υπηρεσίας V2G, η τάση παρουσιάζει μια μικρή πτώση αμέσως μετά την είσοδο της διαταραχής. Η τάση επανέρχεται γρήγορα στην αρχική της τιμή και σταθεροποιείται για την υπόλοιπη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι ακόμα και με μία μικρότερη τιμή του συντελεστή Dur , η αποκατάσταση της τάσης γίνεται αποτελεσματικά στην αρχική τιμή της. Οι Εικόνες 6.35, 6.36, 6.37, 6.38 και 6.39 απεικονίζουν τις μεταβολές των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος μετά την είσοδο της διαταραχής για τιμές του συντελεστή Dur 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.



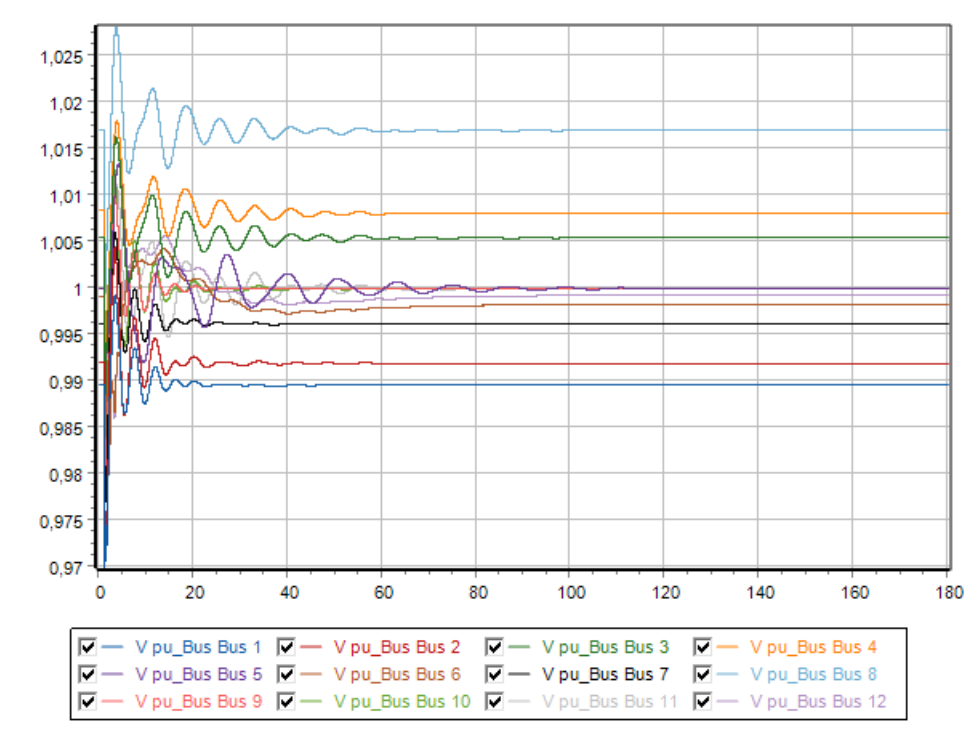
Εικόνα 6.34: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, απουσία V2G



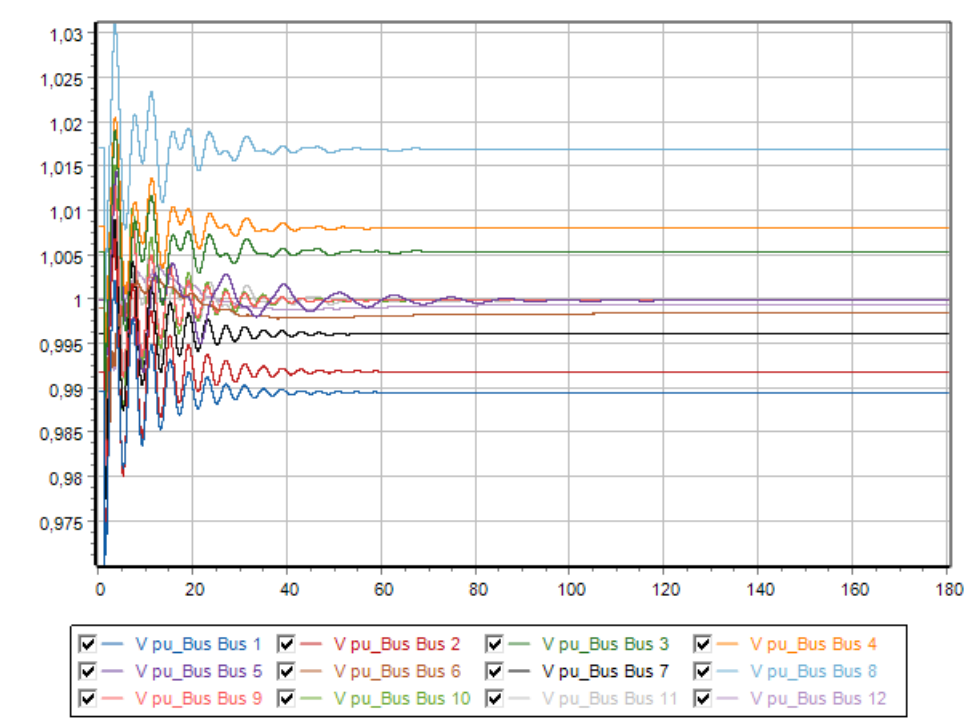
Εικόνα 6.35: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dup=50$



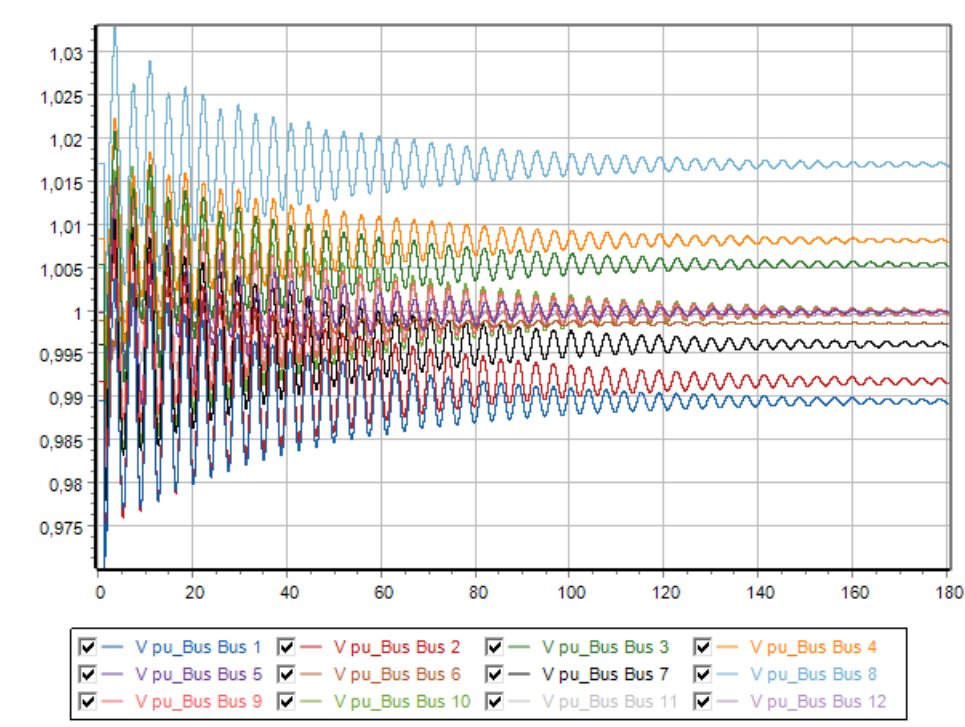
Εικόνα 6.36: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=100$



Εικόνα 6.37: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=200$



Εικόνα 6.38: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=300$



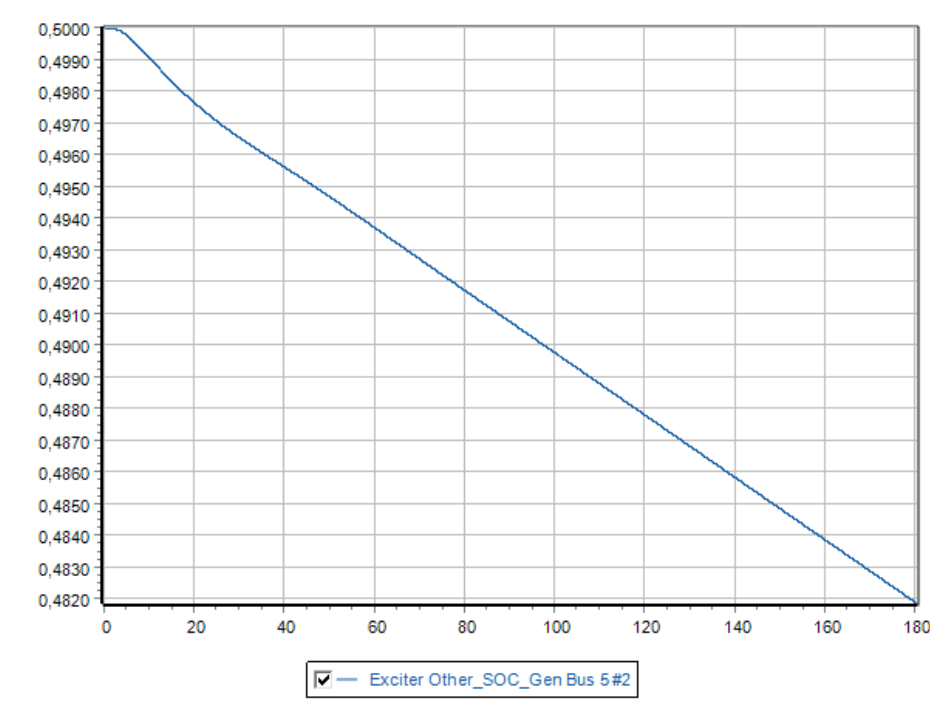
Εικόνα 6.39: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, παρουσία V2G με $dur=400$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

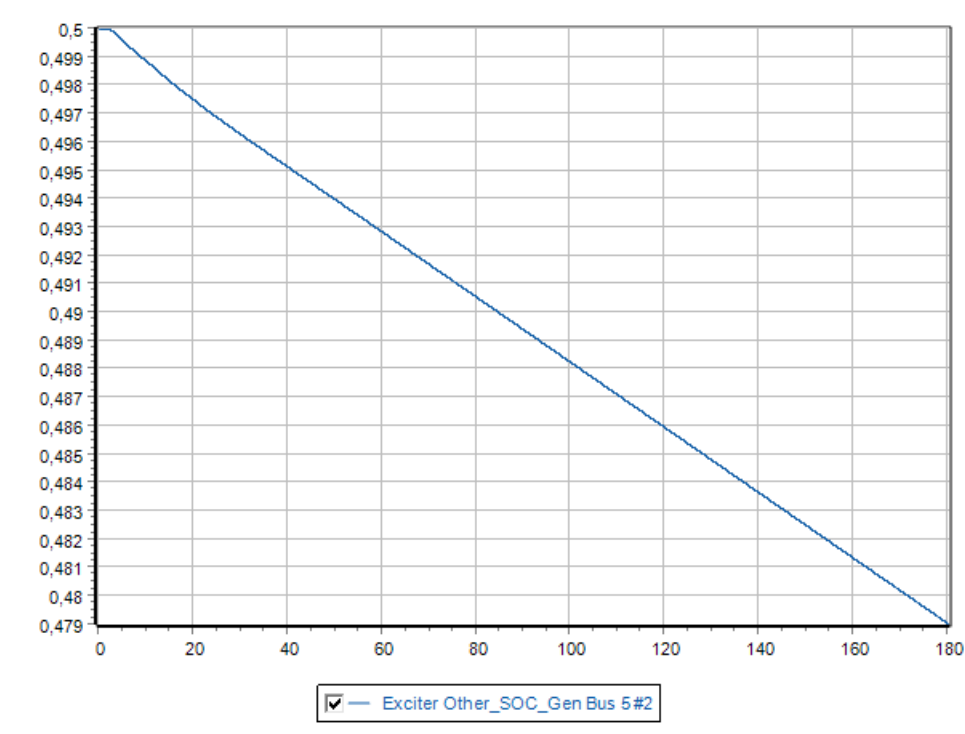
Η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης (ΔSOC) παρουσιάζει και πάλι αύξηση με την αύξηση του συντελεστή Dup. Η μείωση της κατάστασης φόρτισης είναι αρκετά μικρή, αλλά μεγαλύτερη από το Σενάριο 1.1. Αυτό συμβαίνει επειδή η μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από τις μπαταρίες των οχημάτων για να καλυφθεί το ενεργειακό έλλειμμα. Επομένως, οι μπαταρίες υφίστανται μεγαλύτερη αποφόρτιση για να εξισορροπήσουν τις αλλαγές στο σύστημα. Ο Πίνακας 6.5 συνοψίζει τις μεταβολές της κατάστασης φόρτισης για τις τιμές Dup 50, 100, 200, 300 και 400. Οι Εικόνες 6.40, 6.41, 6.42, 6.43 και 6.44 απεικονίζουν τις αντίστοιχες μεταβολές για τους συντελεστές Dup με τιμές 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 1.2.

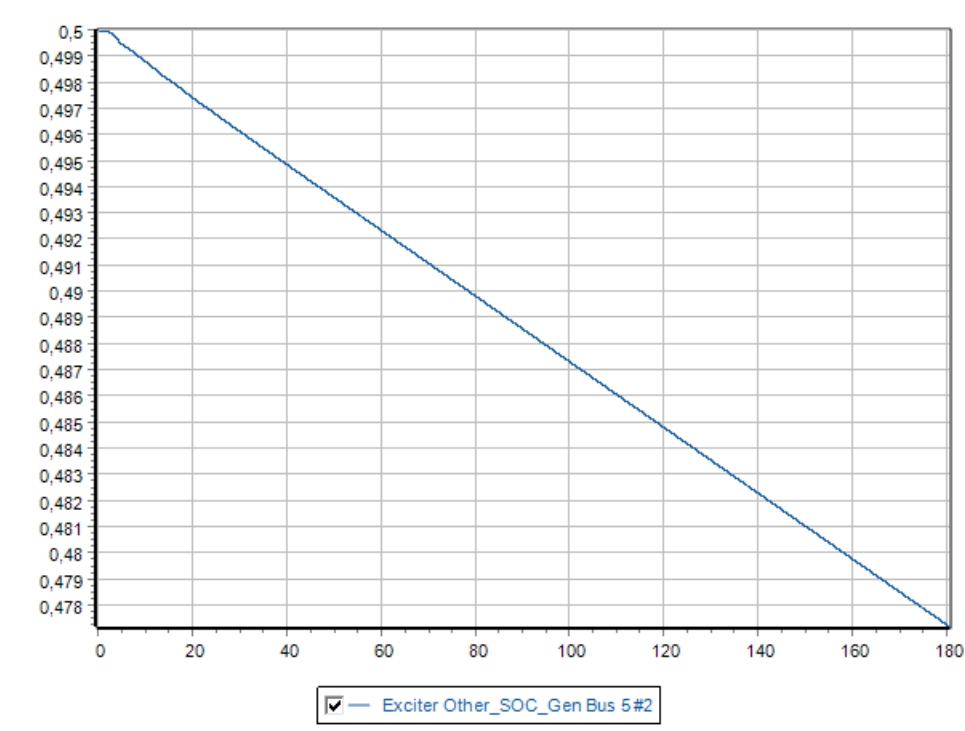
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400
Μεταβολή Κατάστασης Φόρτισης ΔSOC (%)	-1.8	-2.1	-2.3	-2.35	-2.4



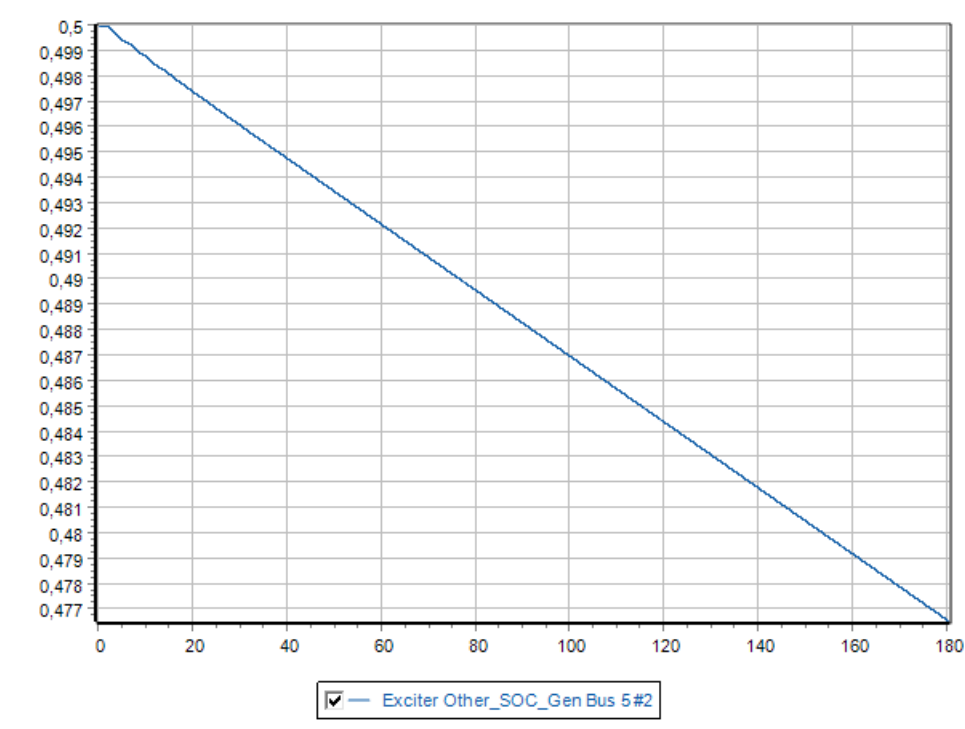
Εικόνα 6.40: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dup=50$



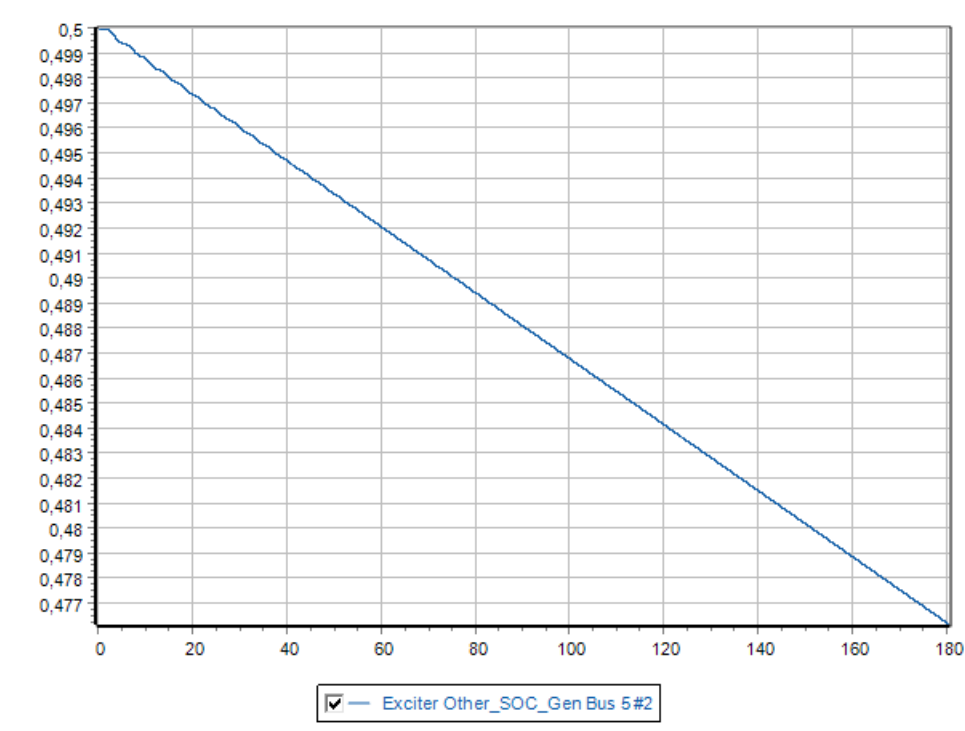
Εικόνα 6.41: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=100$



Εικόνα 6.42: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=200$



Εικόνα 6.43: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dup=300$



Εικόνα 6.44: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dup=400$

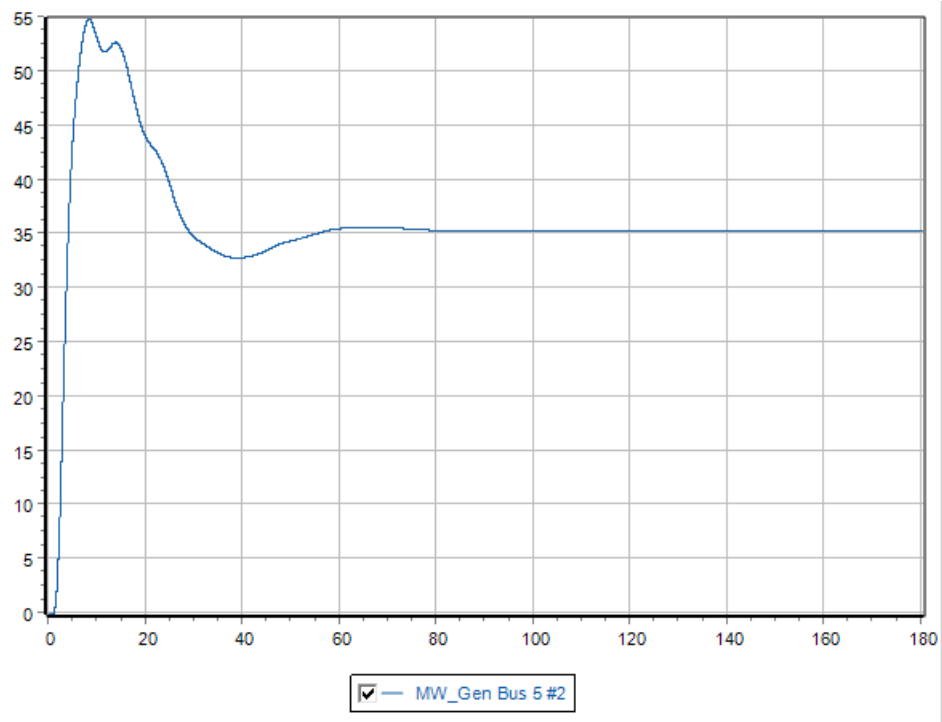
Δ. Πραγματικής Ισχύς και Άεργος Ισχύς

Η ενεργός ισχύς που παρέχεται από τα οχήματα V2G αυξάνεται, προκειμένου να καλυφθεί η μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής από το αιολικό πάρκο. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ενεργού ισχύος στην έξοδο της μονάδας αποθήκευσης. Οι Εικόνες 6.45, 6.46, 6.47, 6.48 και 6.49 αναπαριστούν τη μεταβολή της ενεργού ισχύος για τιμές του συντελεστή Dup 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.

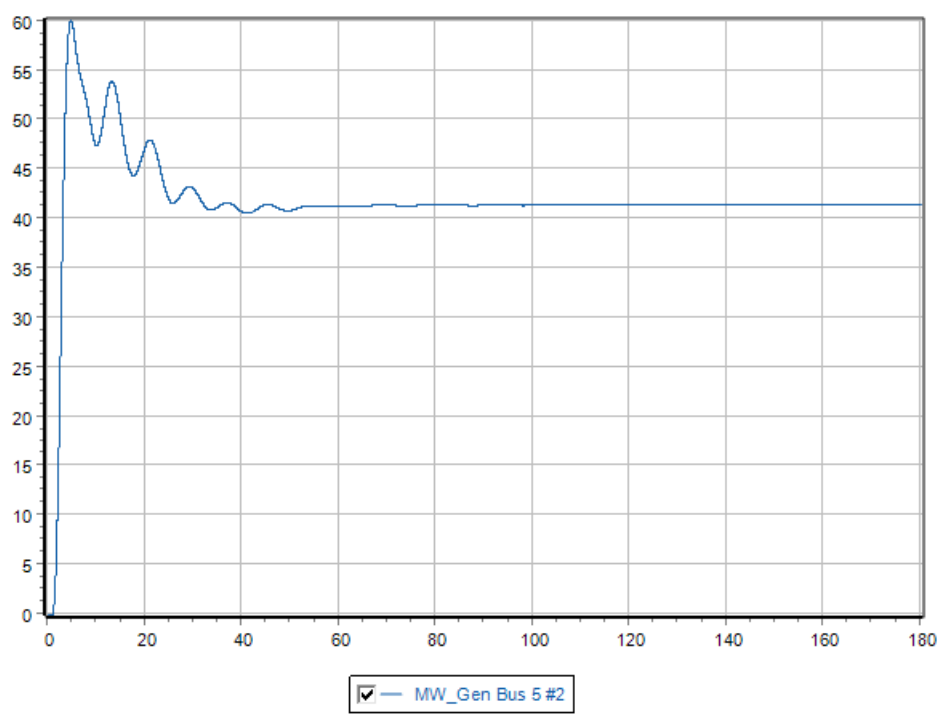
Αντίστοιχα, η άεργη ισχύς που καταναλώνεται αυξάνεται, καθώς το σύστημα χρειάζεται να προσαρμόσει την μεγαλύτερη μεταβολή στην τάση. Σε κάθε περίπτωση, η αύξηση της τιμής του συντελεστή Dup επιφέρει την αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος και της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος. Οι Εικόνες 6.50, 6.51, 6.52, 6.53 και 6.54 απεικονίζουν τη μεταβολή της αέργου ισχύος για τιμές του συντελεστή Dup 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.6 συνοψίζει τις τιμές πραγματικής και αέργου ισχύος στις οποίες ισορροπεί το σύστημα για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή Dup.

*Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 1.2*

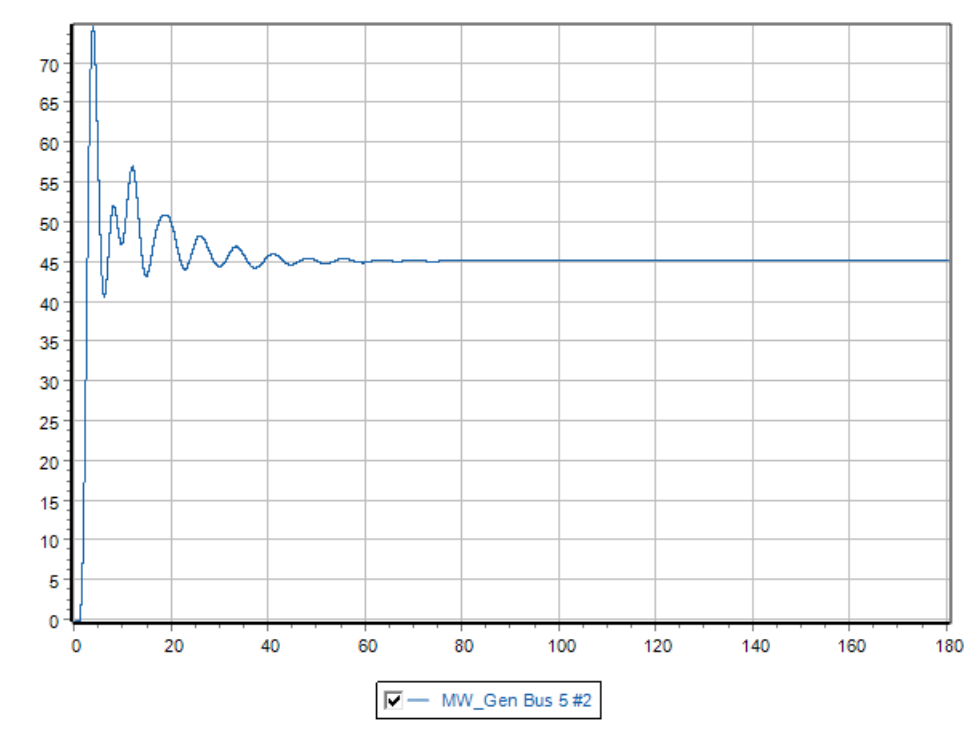
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400
Πραγματική Ισχύς (MW)	35	41	45	46	47.51
Άεργος Ισχύς (MVAR)	-20.05	-21.26	-22	-22.27	-22.42



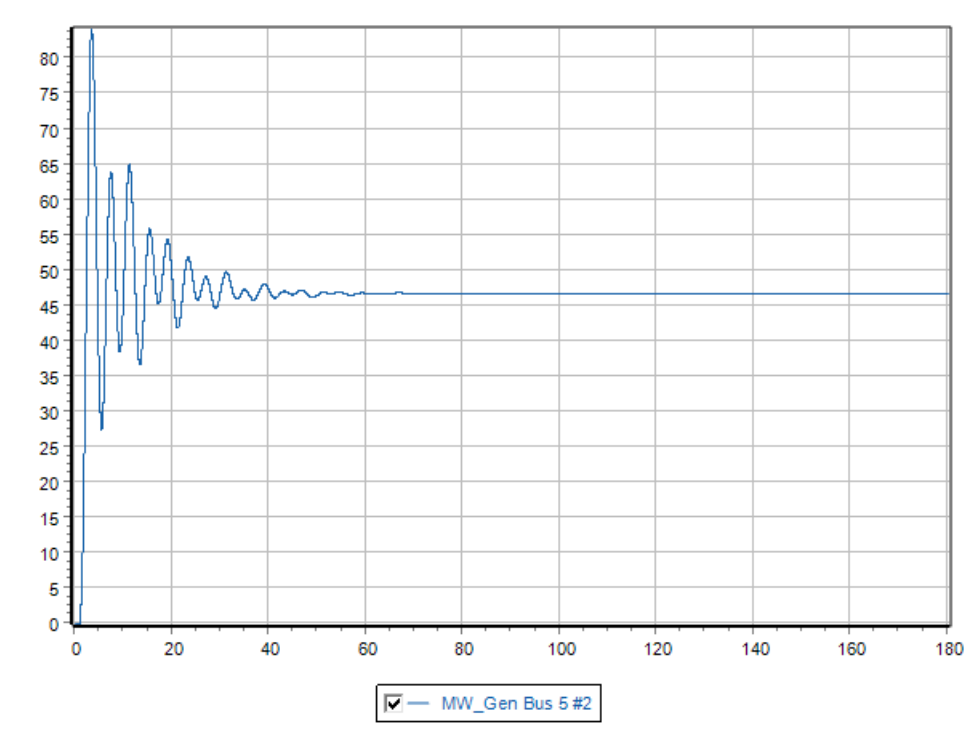
Εικόνα 6.45: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=50$



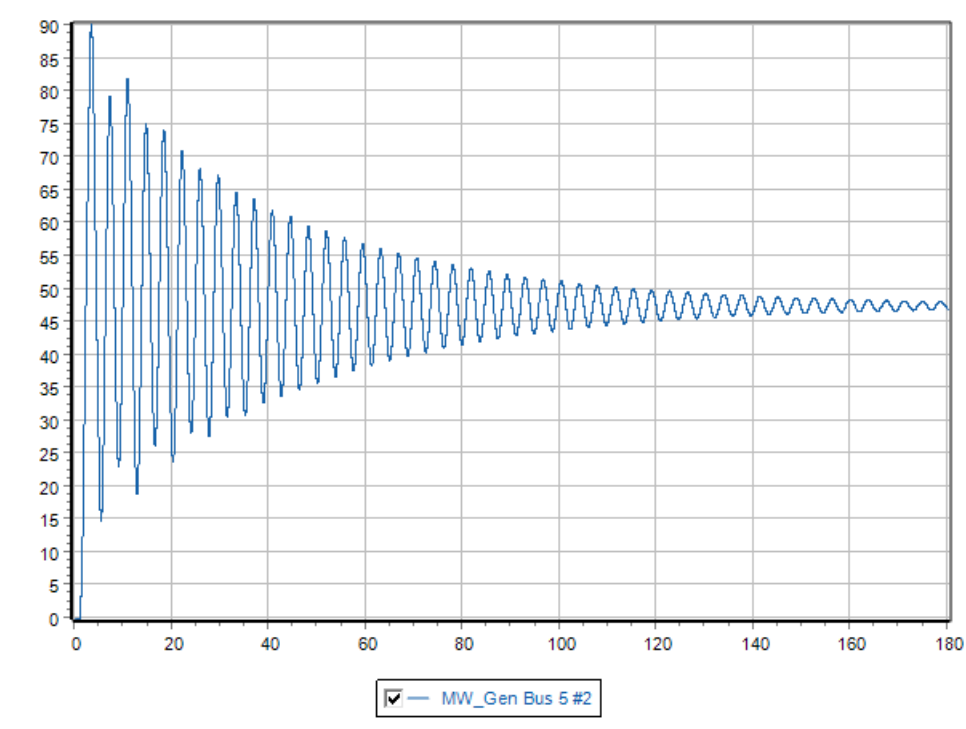
Εικόνα 6.46: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=100$



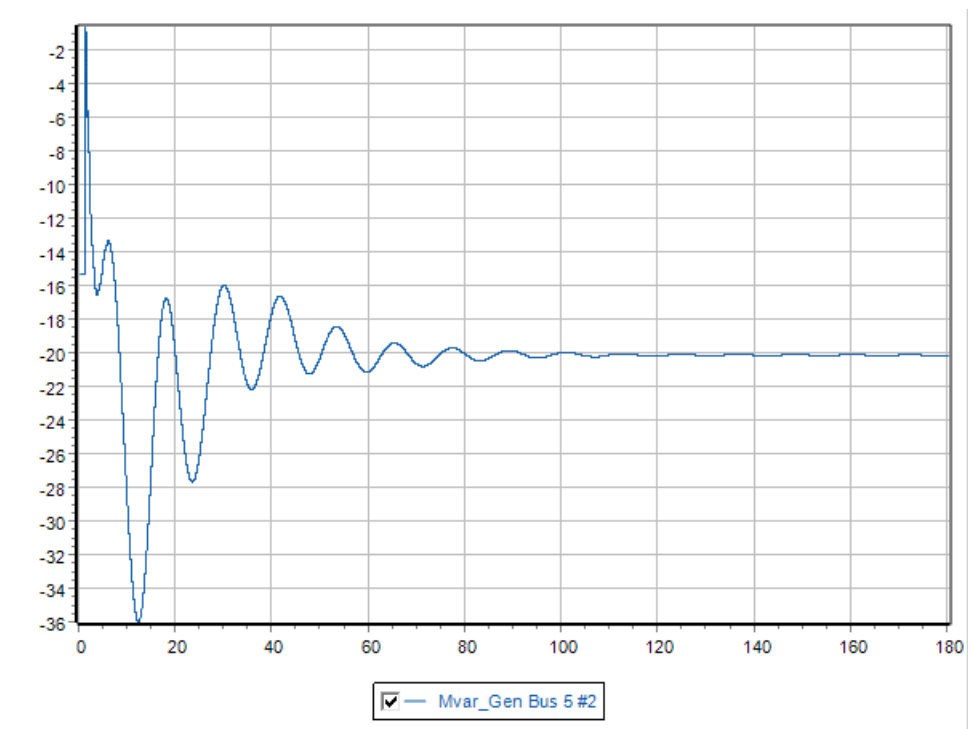
Εικόνα 6.47: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=200$



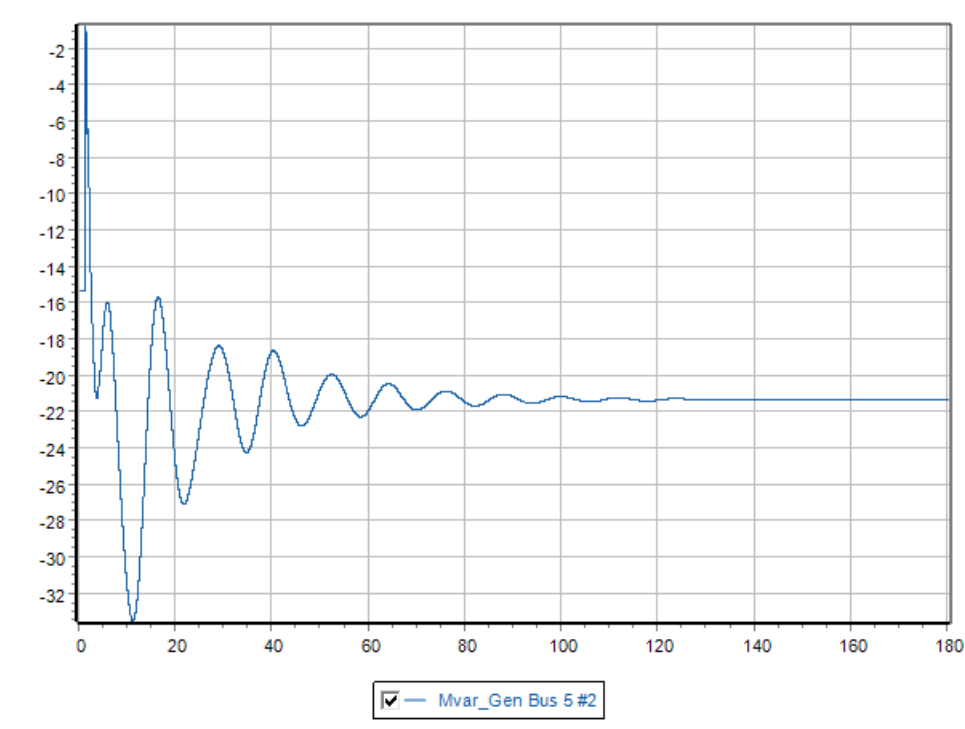
Εικόνα 6.48: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=300$



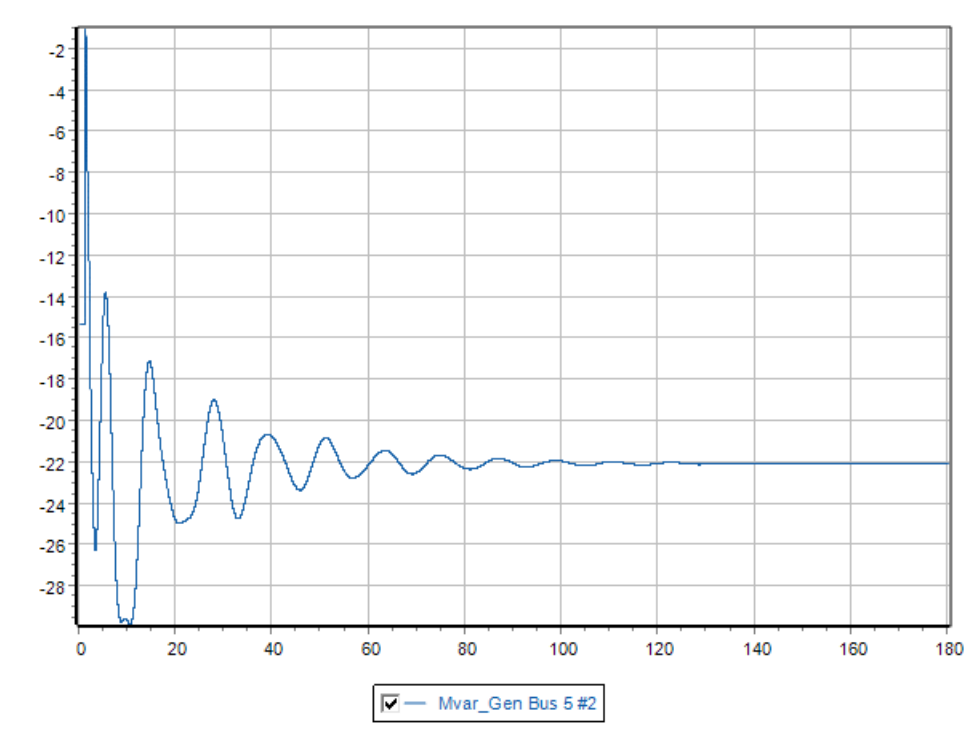
Εικόνα 6.49: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=400$



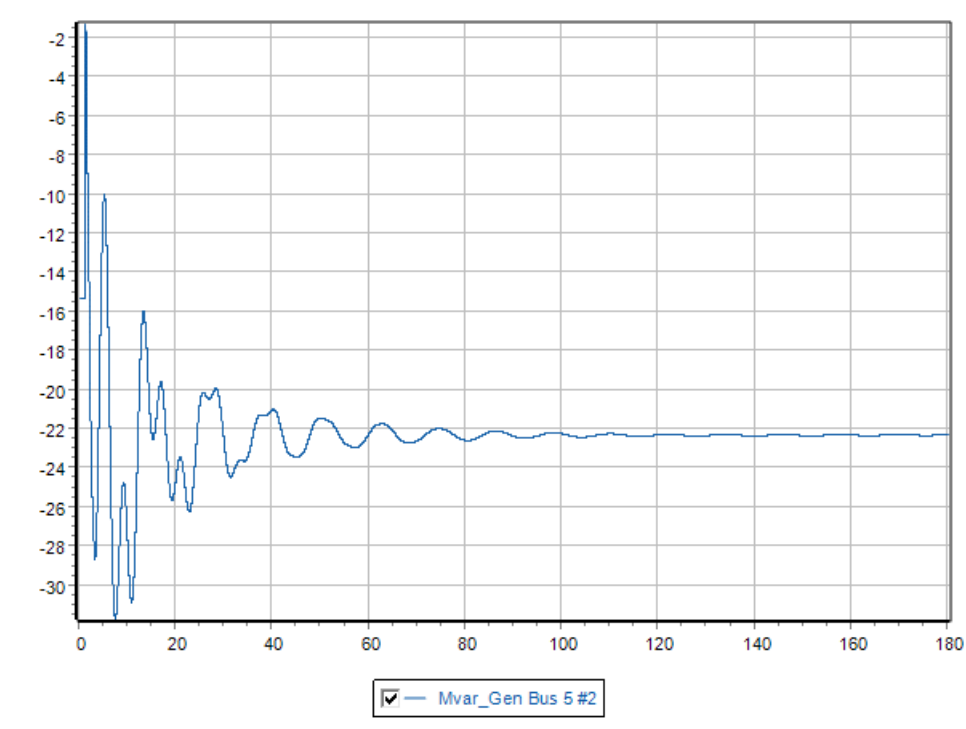
Εικόνα 6.50: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=50$



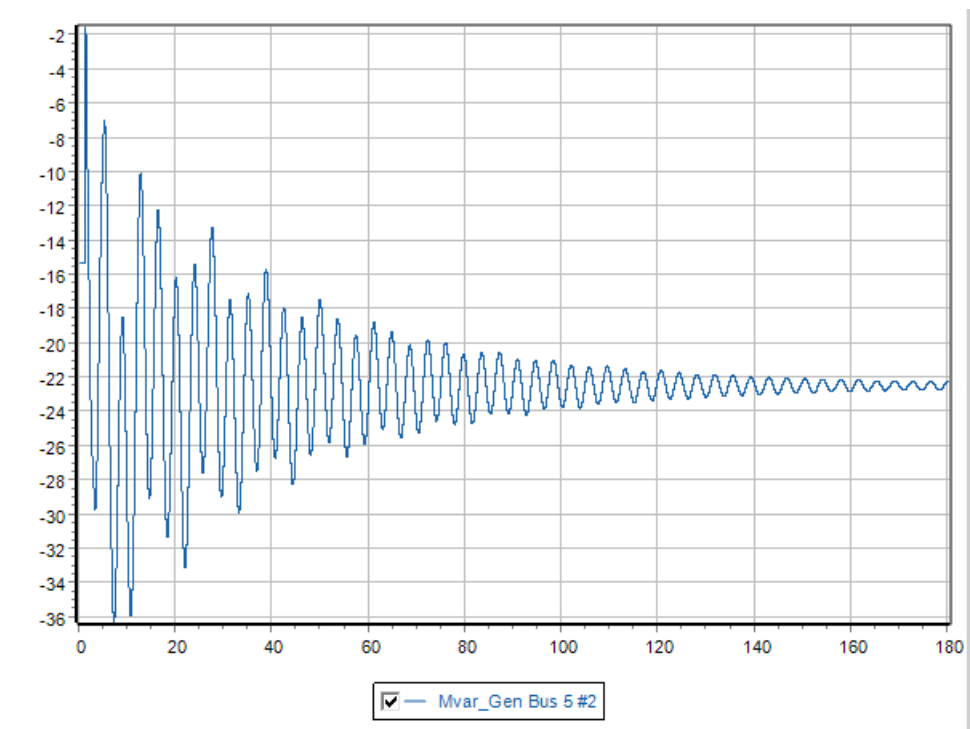
Εικόνα 6.51: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dip=100$



Εικόνα 6.52: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dip=200$



Εικόνα 6.53: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=300$



Εικόνα 6.54: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά τη μείωση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 50%, με $dur=400$

Σενάριο 1.3: Απομάκρυνση παραγωγής από το αιολικό πάρκο (100MW) – Άνοιγμα των διακοπών

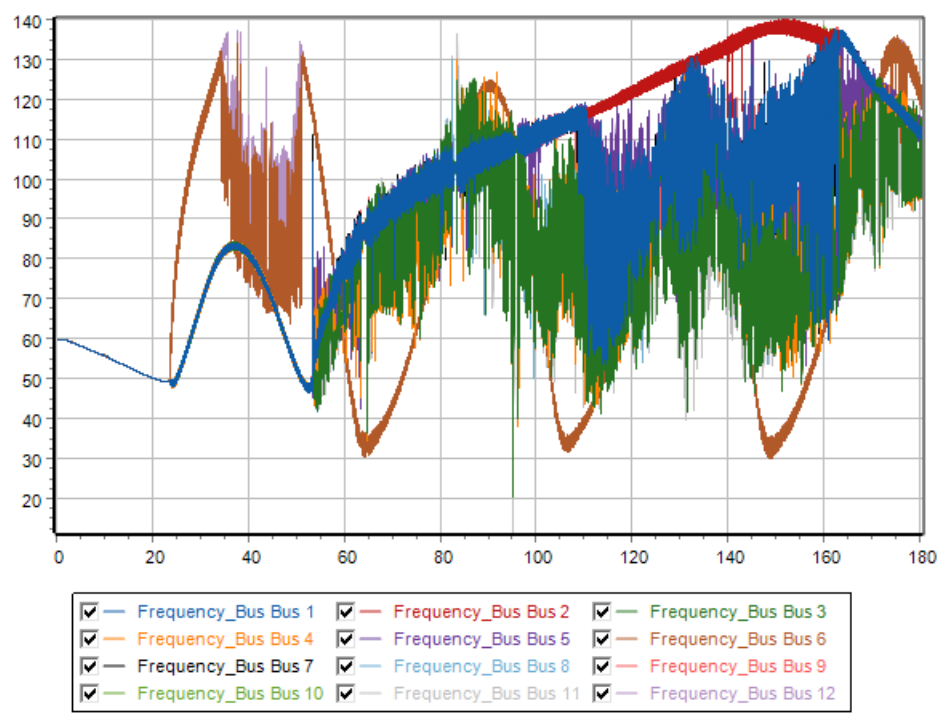
Α. Συχνότητα

Στο Σενάριο 1.3 εξετάζεται η πλήρης απομάκρυνση της παραγωγής από το αιολικό πάρκο μετά το άνοιγμα του αντίστοιχου διακόπτη στο σύστημα. Αμέσως μετά την αποσύνδεση του αιολικού πάρκου, η συχνότητα αρχίζει να αυξομειώνεται έντονα και με διαφορετικό τρόπο σε κάθε ζυγό. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη, καθώς το σύστημα προσπαθεί να σταθεροποιηθεί μετά την ξαφνική απώλεια μιας σημαντικής πηγής παραγωγής. Οι παρατηρούμενες ταλαντώσεις υποδεικνύουν τη δυσκολία του συστήματος να επανέλθει σε σταθερή κατάσταση και την επακόλουθη αστάθεια. Η Εικόνα 6.55 απεικονίζει τη μεταβολή της συχνότητας μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου, απουσία της διαδικασίας V2G.

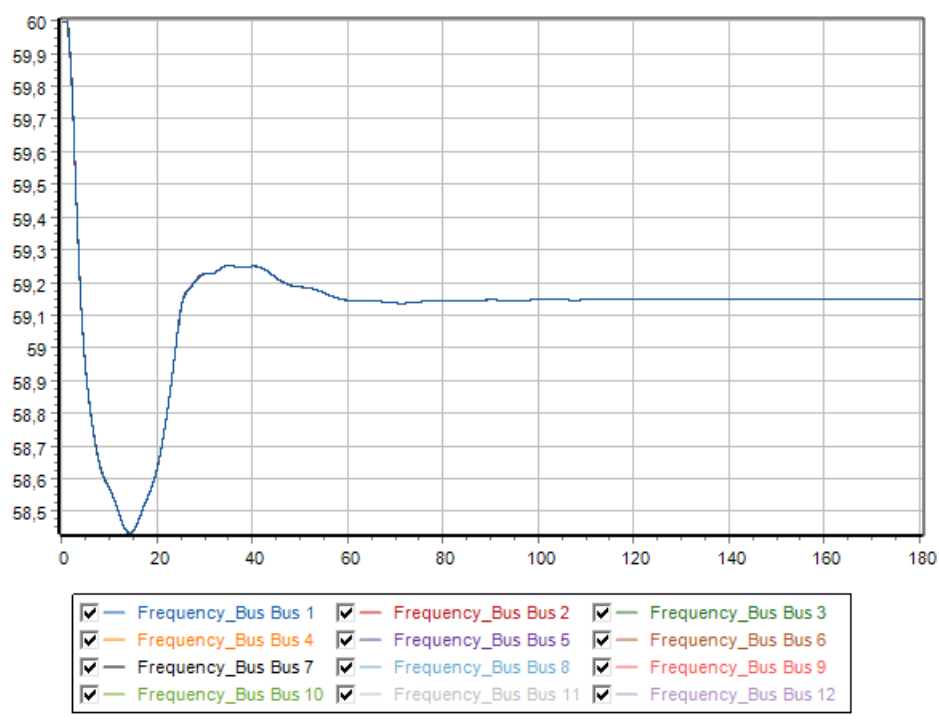
Οι Εικόνες 6.56, 6.57 και 6.58 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας μετά την εισαγωγή των διαταραχών για τιμές Dup 50, 100 και 200, αντίστοιχα. Παρουσία της V2G, στην αρχή του εκάστοτε διαγράμματος, παρατηρείται μια μείωση στη συχνότητα η οποία στη συνέχεια σταθεροποιείται σε μία σταθερή τιμή. Σε αντίθεση με το προηγούμενο διάγραμμα της Εικόνας 6.55, όλες οι καμπύλες εδώ φαίνεται να είναι ταυτόσημες, γεγονός που υποδηλώνει ότι το V2G σύστημα λειτουργεί το ίδιο αποτελεσματικά σε ολόκληρο το δίκτυο και σε όλους τους ζυγούς. Παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής Dup μειώνει το σφάλμα συχνότητας αλλά μπορεί να οδηγήσει σε διαρκείς ταλαντώσεις σταθερού πλάτους όταν υπερβεί μία ορισμένη τιμή, όπως στην Εικόνα 6.59 που απεικονίζει τη μεταβολή για τιμή Dup 300. Ο Πίνακας 6.7 απεικονίζει τα αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος για τις διάφορες τιμές του Dup.

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 1.3

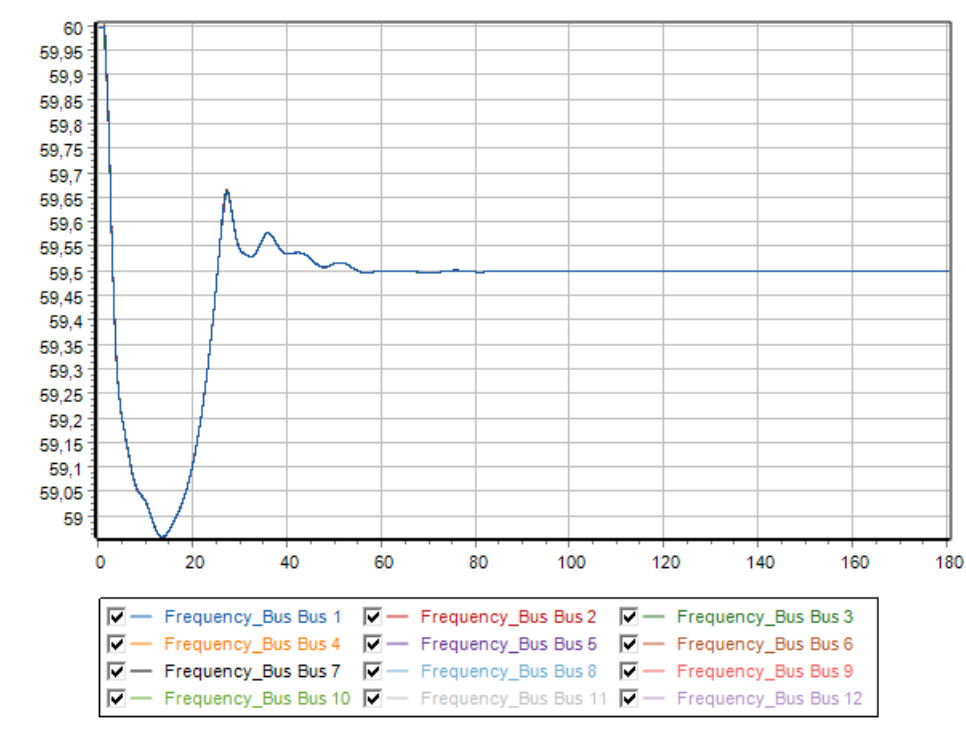
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	0.849	0.497	0.272	Ταλάντωση



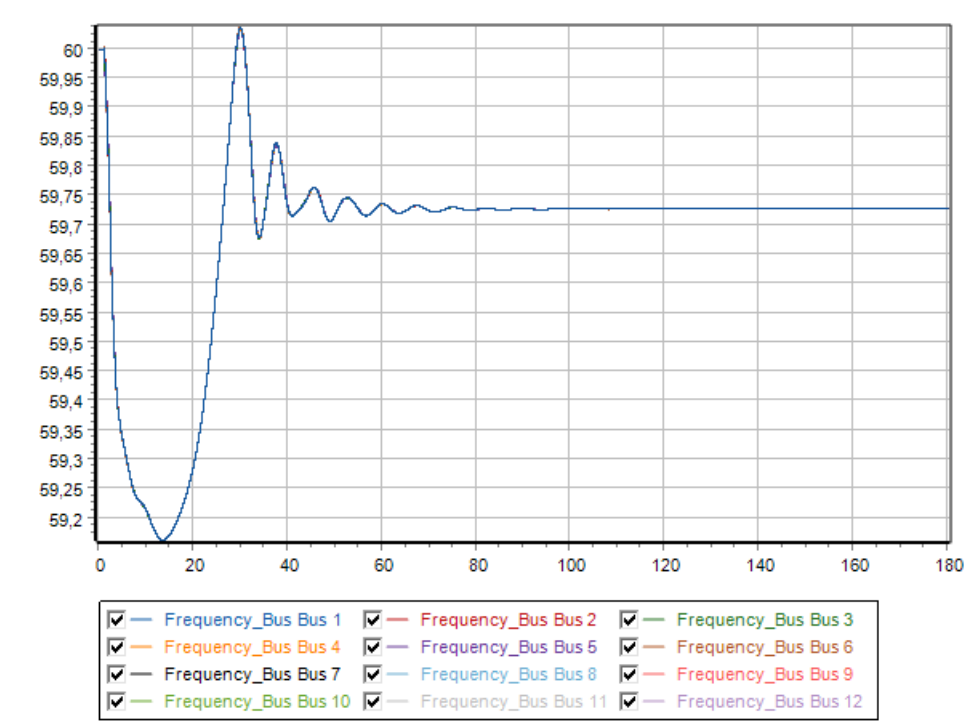
Εικόνα 6.55: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου απουσία V2G



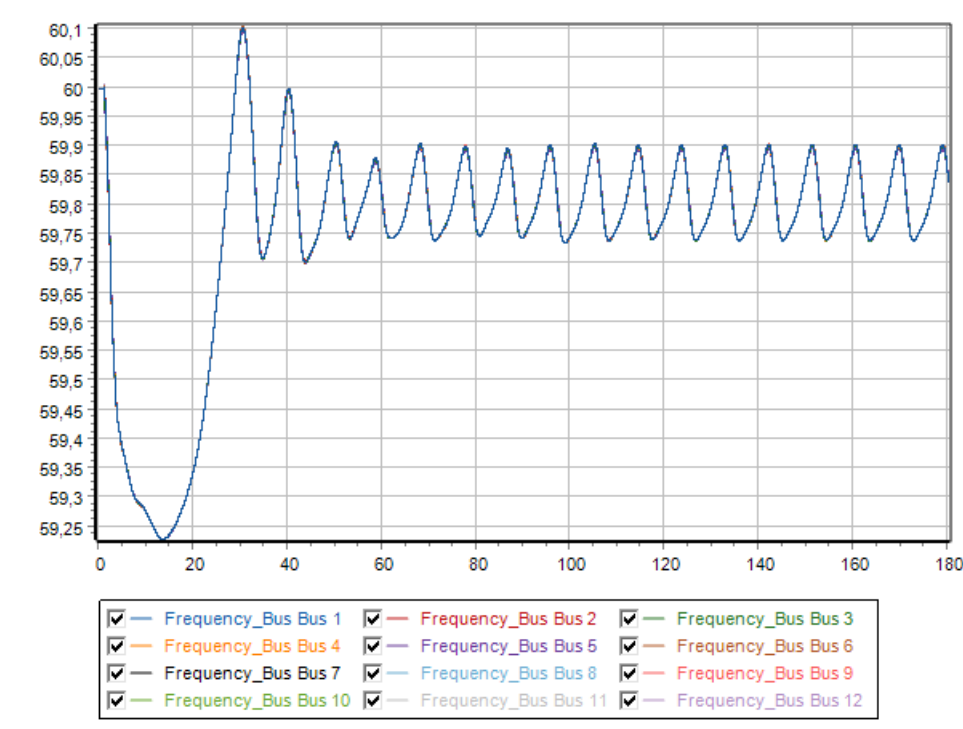
Εικόνα 6.56: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur=50$



Εικόνα 6.57: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur=100$



Εικόνα 6. 58: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur=200$

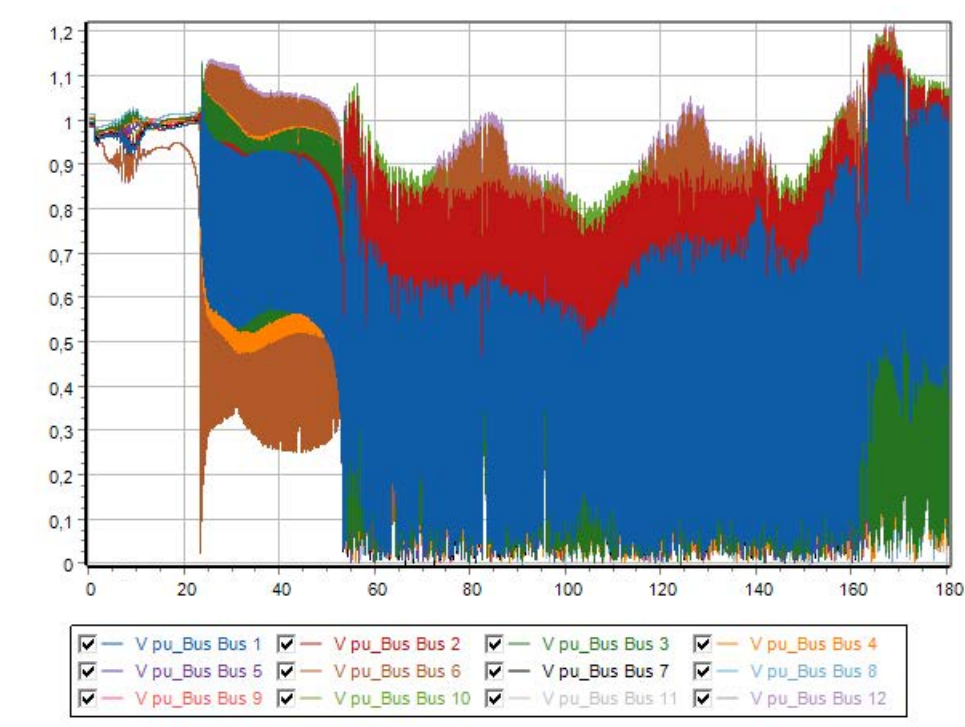


Εικόνα 6.59: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur}=300$

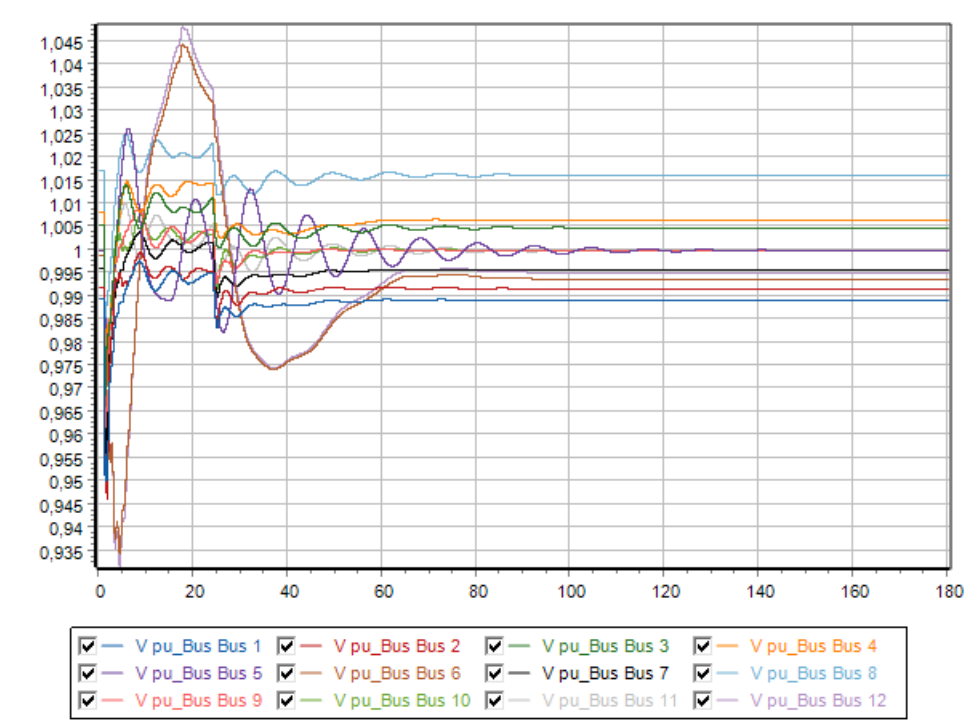
Β. Τάση

Στο συγκεκριμένο σενάριο, παρατηρείται ότι οι τάσεις στους διάφορους ζυγούς παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, οι οποίες οδηγούν σε κατάρρευση τάσης. Η τάση στους ζυγούς δεν σταθεροποιείται εντός της περιόδου παρατήρησης. Η Εικόνα 6.60 απεικονίζει τη μεταβολή της τάσης μετά την είσοδο της διαταραχής χωρίς την υπηρεσία V2G.

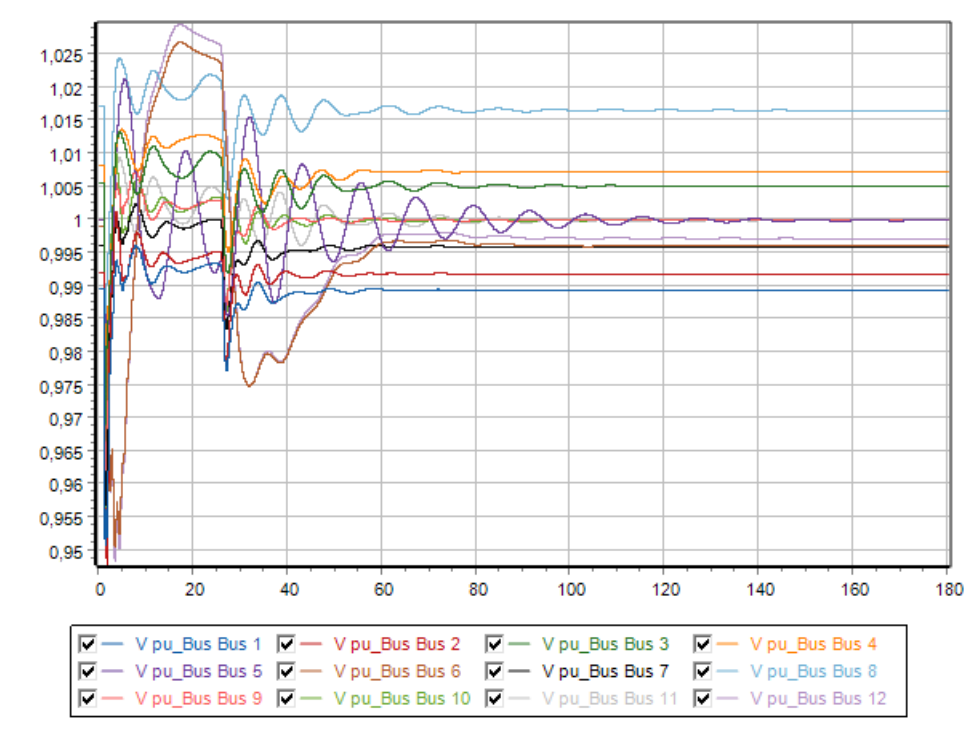
Αντιθέτως, τα ηλεκτρικά οχήματα που συνδέονται στο δίκτυο μέσω της υπηρεσίας V2G συμβάλλουν στη μείωση των αποκλίσεων της τάσης και επιταχύνουν την αποκατάσταση μετά τη διαταραχή. Στα διαγράμματα, παρατηρείται η ταχεία απόσβεση των ταλαντώσεων και η σταθεροποίηση της τάσης στην αρχική της τιμή, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων τιμών του συντελεστή Dup . Οι Εικόνες 6.61, 6.62 και 6.63 απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης για συντελεστή Dup 50, 100 και 200, αντίστοιχα. Μία υπερβολικά αυξημένη τιμή της παραμέτρου Dup σε 300 pu οδηγεί την τάση σε μόνιμη ταλάντωση σταθερού πλάτους, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.64.



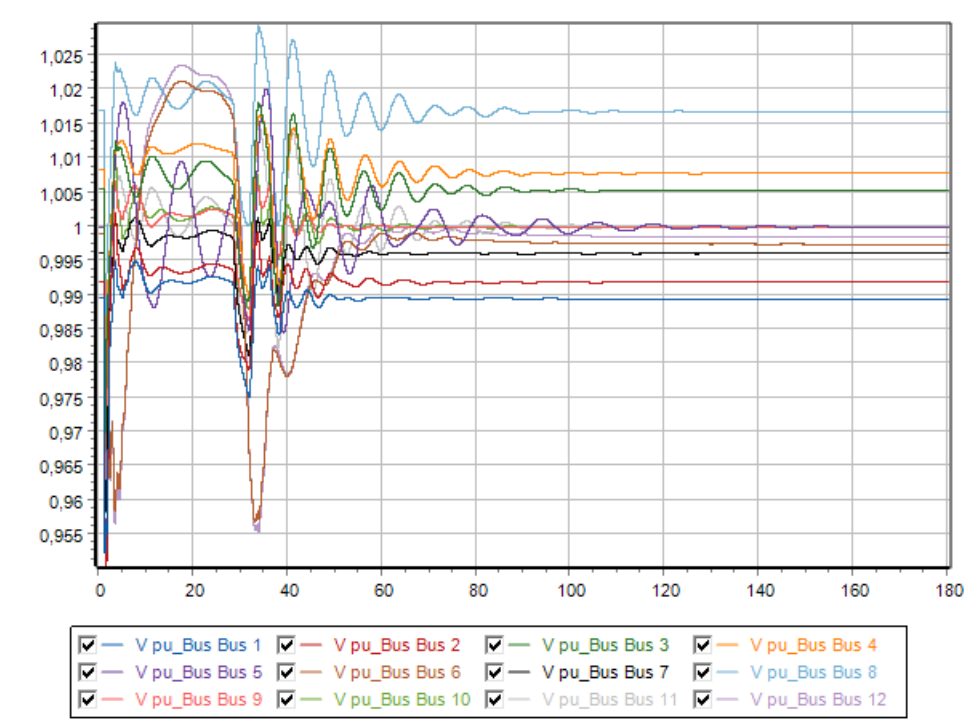
Εικόνα 6.60: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου απουσία V2G



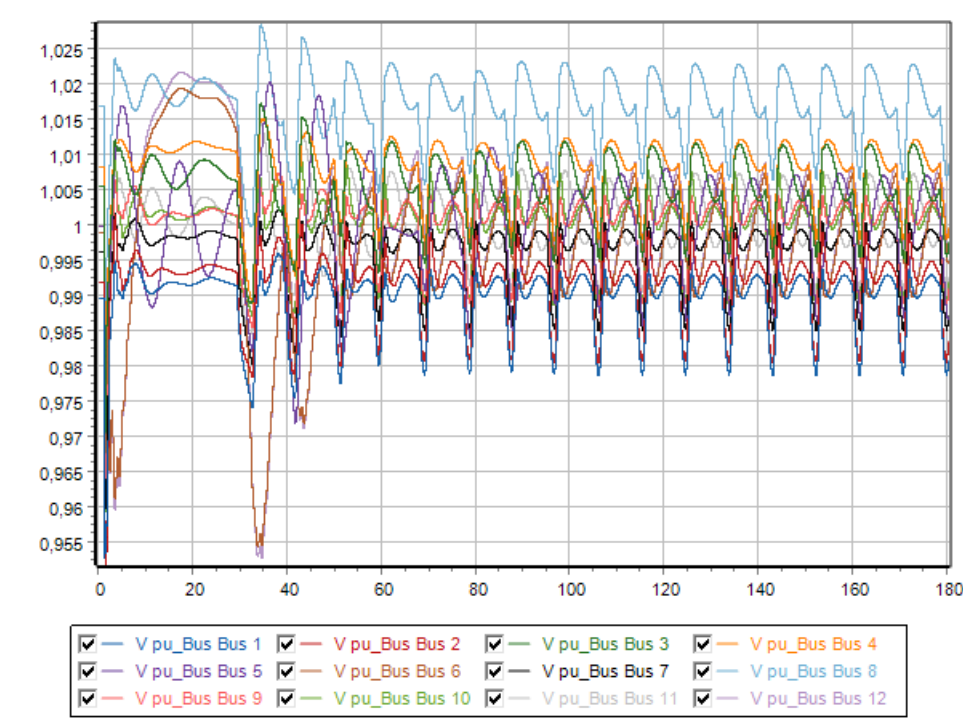
Εικόνα 6.61: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 50$



Εικόνα 6.62: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $\text{dur} = 100$



Εικόνα 6.63: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G λειτουργίας με $\text{dur} = 200$



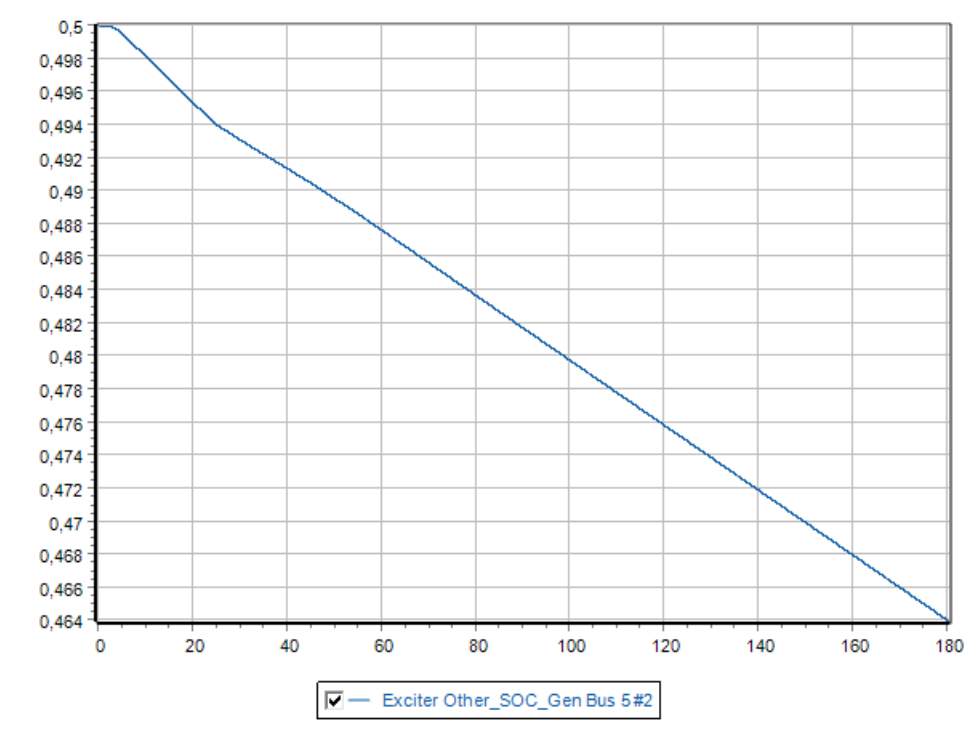
Εικόνα 6.64: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία $V2G$ $dur = 300$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

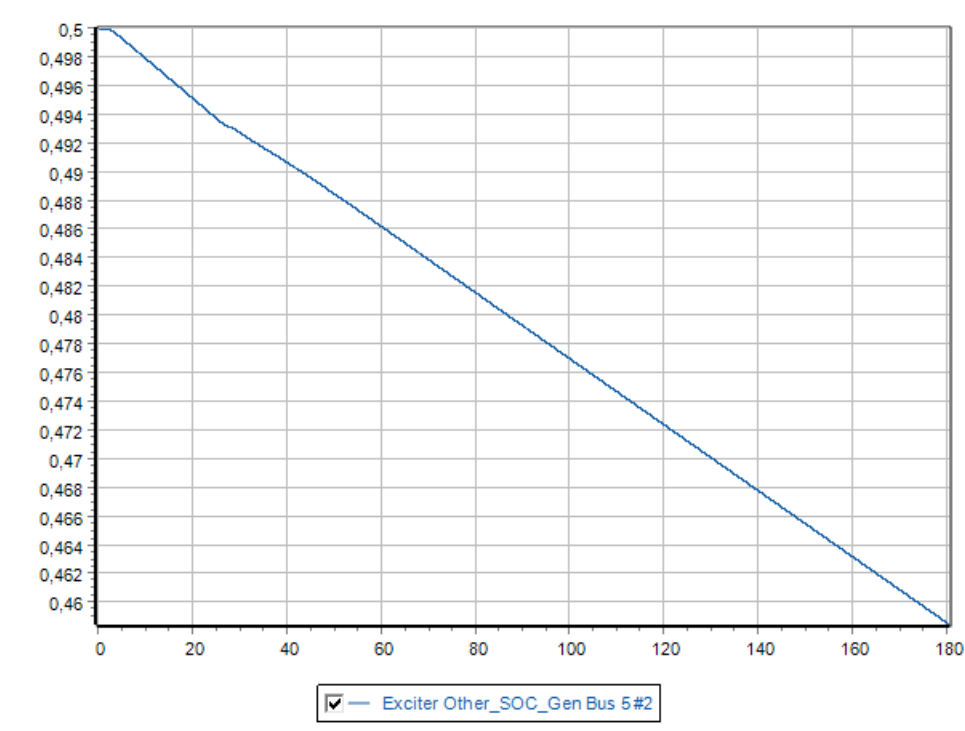
Η ποσοστιαία μεταβολή της κατάστασης φόρτισης (ΔSOC) εμφανίζει επιπλέον μείωση με την αύξηση του συντελεστή Dur , όπως αναμενόταν. Η μείωση της κατάστασης φόρτισης είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα προηγούμενα σενάρια, γεγονός που δικαιολογείται από την μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο σενάριο. Οι Εικόνες 6.65, 6.66, 6.67 και 6.68 απεικονίζουν τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης για τιμές Dur 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.8 συνοψίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα της μεταβολής της κατάστασης φόρτισης για τις διάφορες τιμές του συντελεστή Dur .

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 1.3

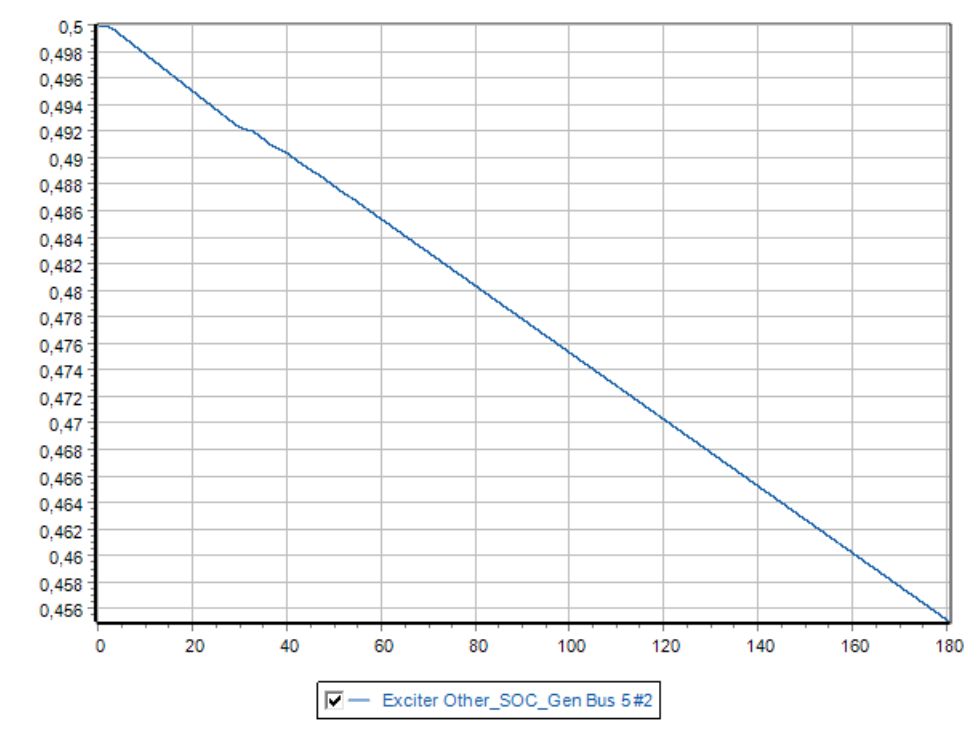
Συντελεστής Dur (pu)	50	100	200	300
Μεταβολή Κατάστασης Φόρτισης ΔSOC (%)	-3.6	-4.1	-4.5	-4.6



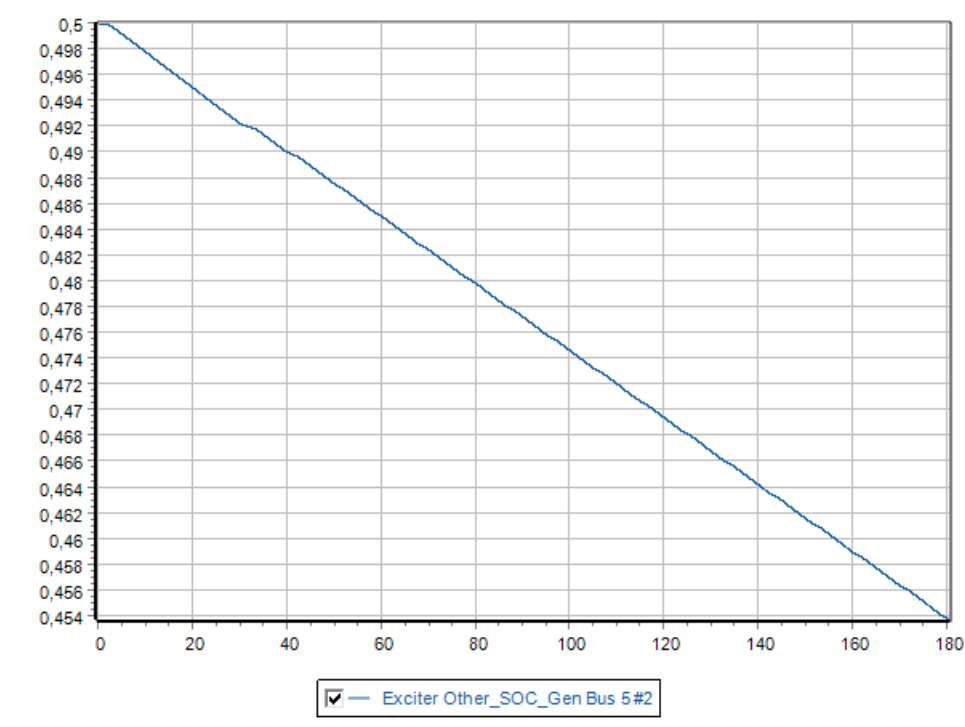
Εικόνα 6.65: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dup = 50$



Εικόνα 6.66: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dup = 100$



Εικόνα 6.67: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 200$



Εικόνα 6.68: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 300$

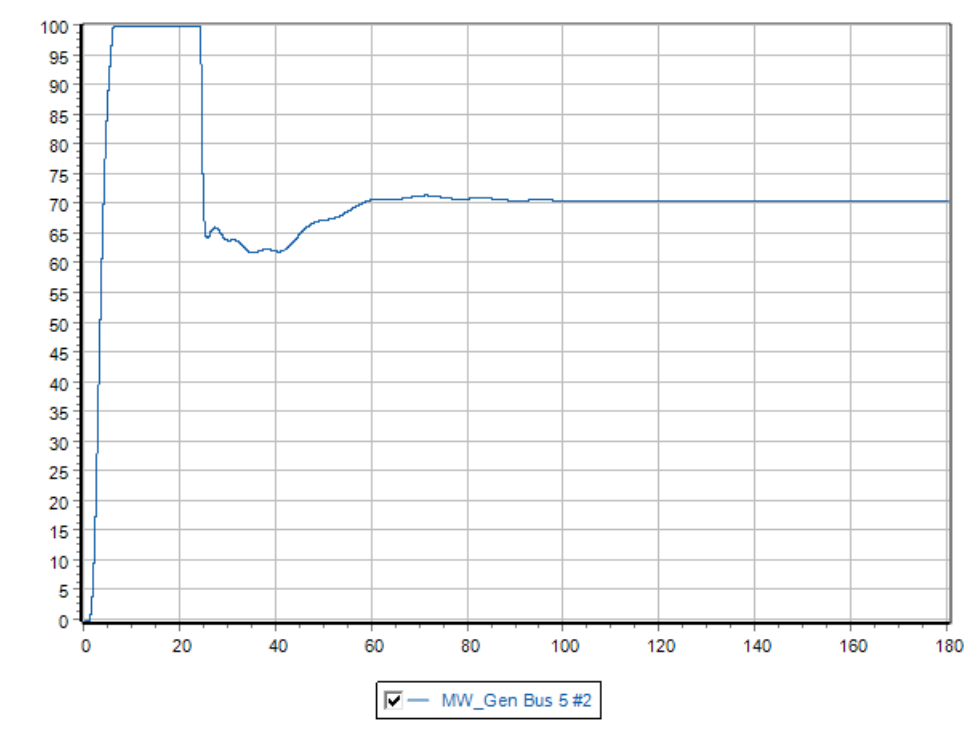
Δ. Πραγματικής Ισχύς και Άεργος Ισχύς

Η ενεργός ισχύς που παρέχεται από τα οχήματα V2G αυξάνει ανάλογα με την τιμή του συντελεστή D_{up} , προκειμένου να καλυφθεί η απομάκρυνση της παραγωγής από το αιολικό πάρκο. Ωστόσο, είναι πάντα μικρότερη της μέγιστης τιμής $P_{max} = 100 \text{ MW}$, τιμή που υποδηλώνει το μέγιστο επίπεδο ισχύος που μπορεί να προσφέρει το σύστημα V2G για να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου. Οι Εικόνες 6.69, 6.70, 6.71 και 6.72 απεικονίζουν τη μεταβολή της ενεργού ισχύος για τιμές D_{up} 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα.

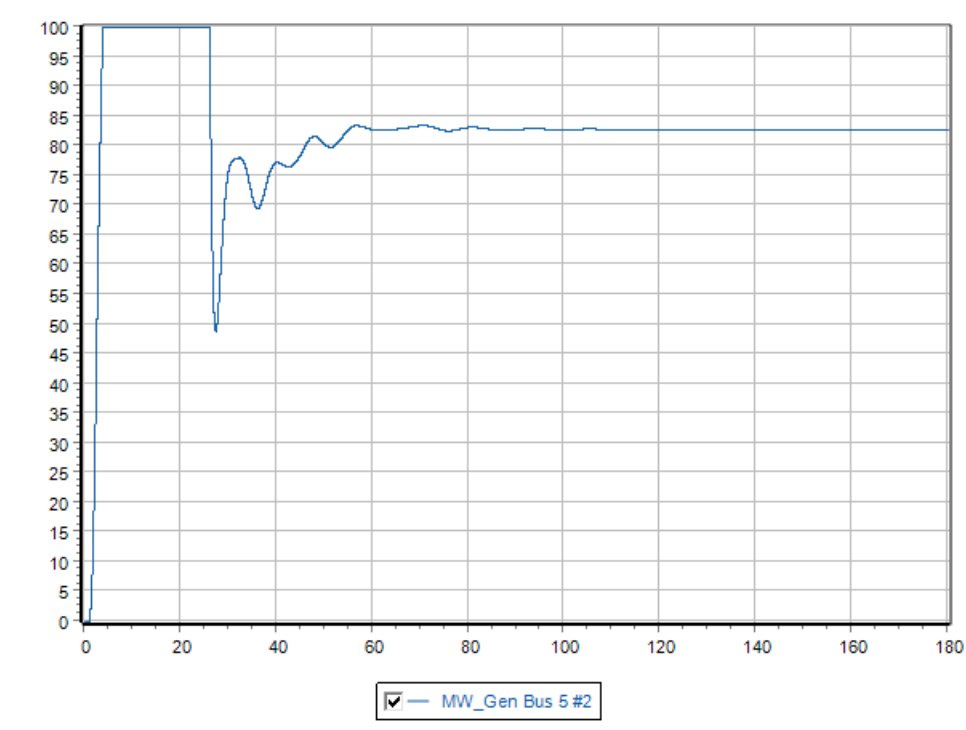
Αντίστοιχα, η άεργη ισχύς που καταναλώνεται λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές με την αύξηση του D_{up} και το σύστημα προσαρμόζει την τάση σε αποδεκτά επίπεδα. Οι Εικόνες 6.73, 6.74, 6.75 και 6.76 απεικονίζουν τη μεταβολή της αέργου ισχύος για τιμές D_{up} 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.9 συνοψίζει τις τελικές τιμές πραγματικής και αέργου ισχύος για τις διάφορες τιμές του συντελεστή D_{up} .

*Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 1.3*

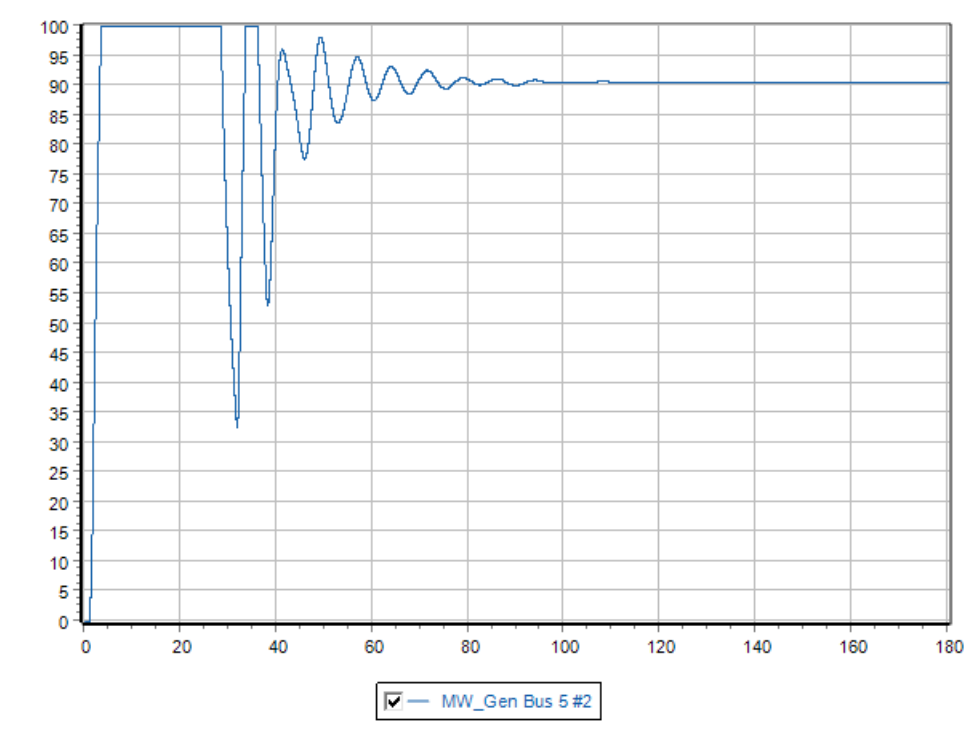
Συντελεστής D_{up} (pu)	50	100	200	300
Πραγματική Ισχύς εξόδου (MW)	70	82	90	Ταλάντωση
Άεργος Ισχύς εξόδου (MVAR)	-25	-26	-29	Ταλάντωση



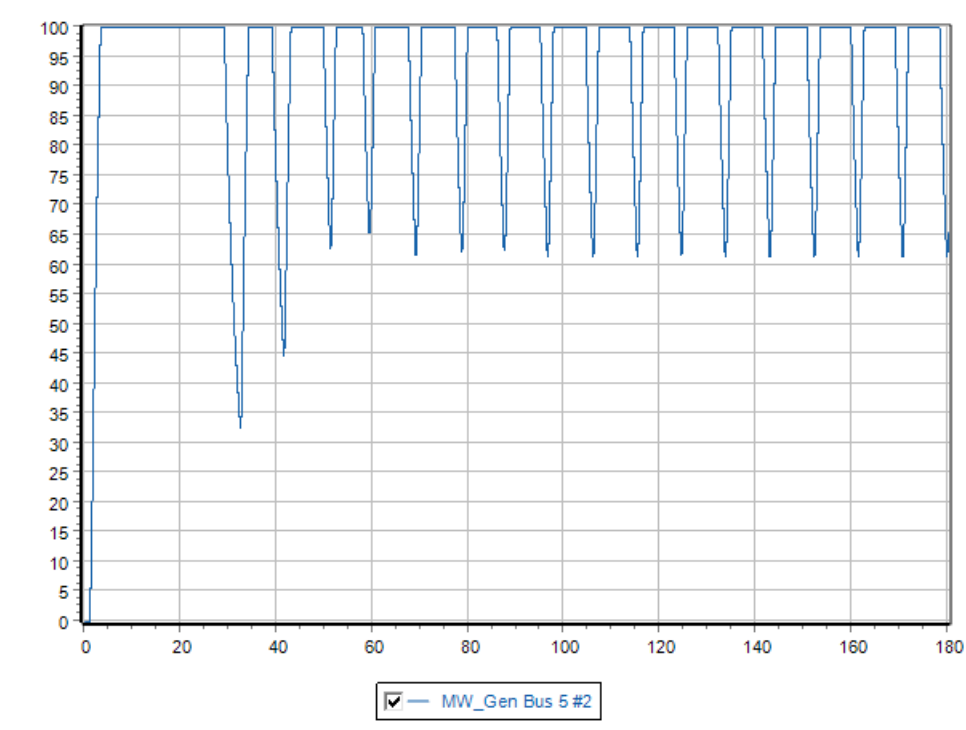
Εικόνα 6.69: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου, παρουσία V2G με $dur = 50$



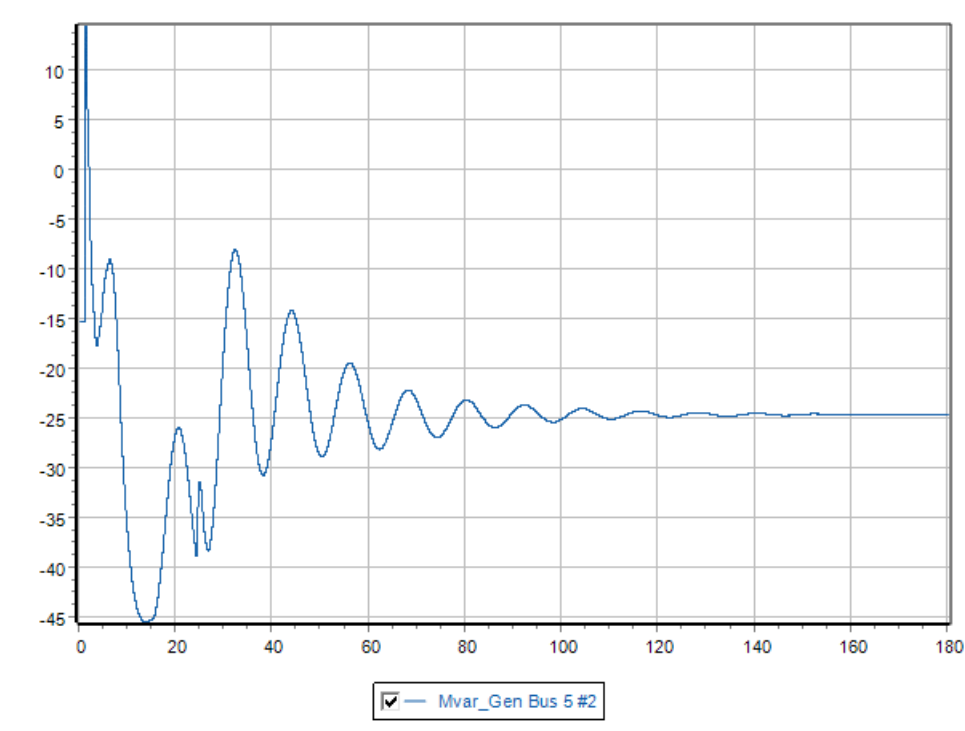
Εικόνα 6.70: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου, παρουσία V2G με $dur = 100$



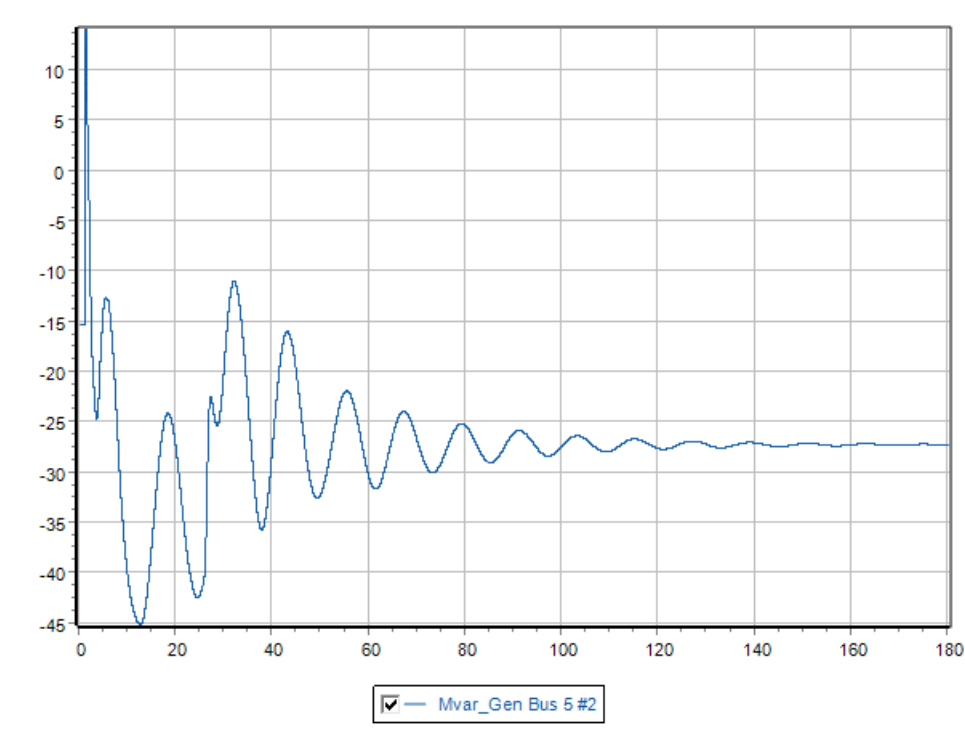
Εικόνα 6.71: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 200$



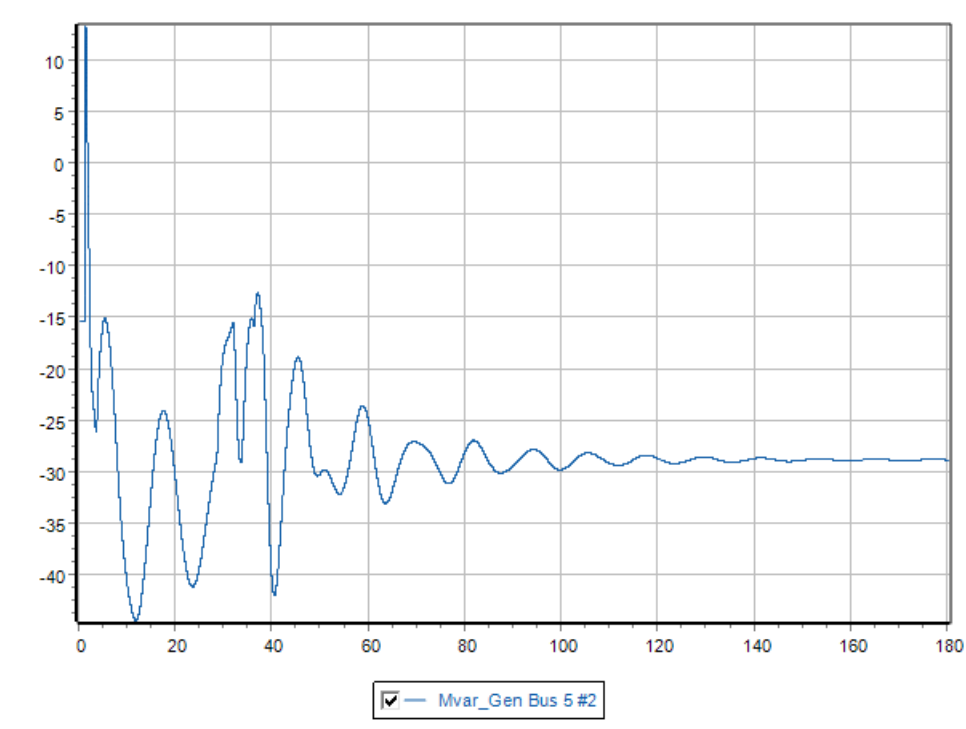
Εικόνα 6.72: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 300$



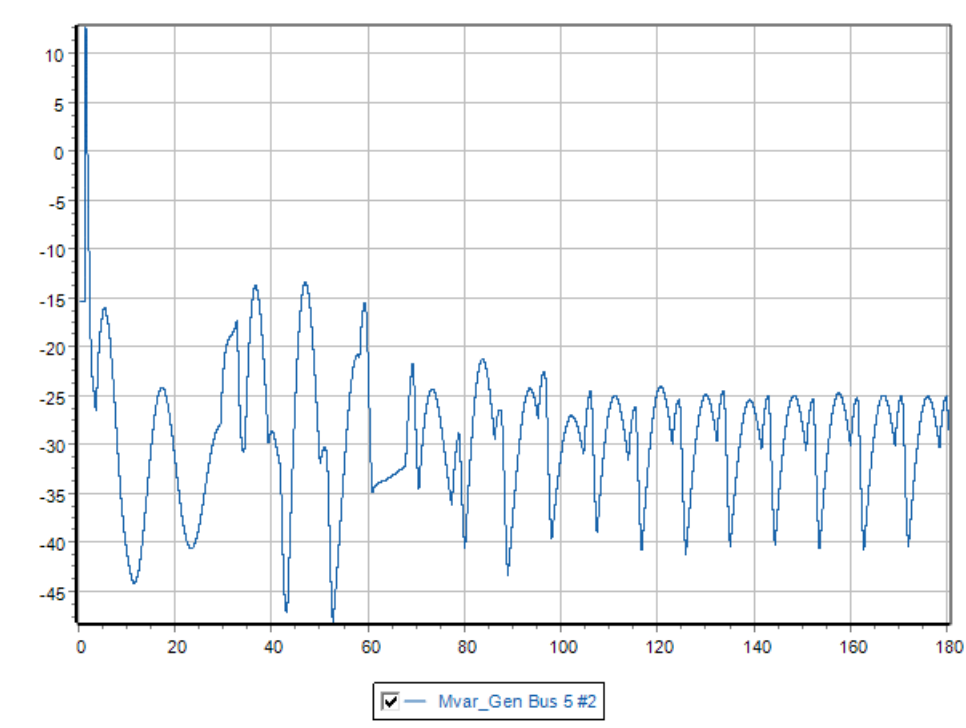
Εικόνα 6.73: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 50$



Εικόνα 6.74: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 100$



Εικόνα 6.75: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 200$



Εικόνα 6.76: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την απομάκρυνση της παραγωγής του αιολικού πάρκου παρουσία V2G με $dur = 300$

Σενάριο 2: Μείωση της Παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού (V2G)

Στο Σενάριο 2, εξετάζεται η μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού που βρίσκεται στον ζυγό 12. Συναφώς με το Σενάριο 1, πραγματοποιούνται αναλύσεις με μεταβολές διαφορετικού μεγέθους για να αξιολογηθεί η ικανότητα του συστήματος V2G (Vehicle-to-Grid) να αποκαταστήσει την ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος.

Σενάριο 2.1: Μείωση της Παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% (33 MW)

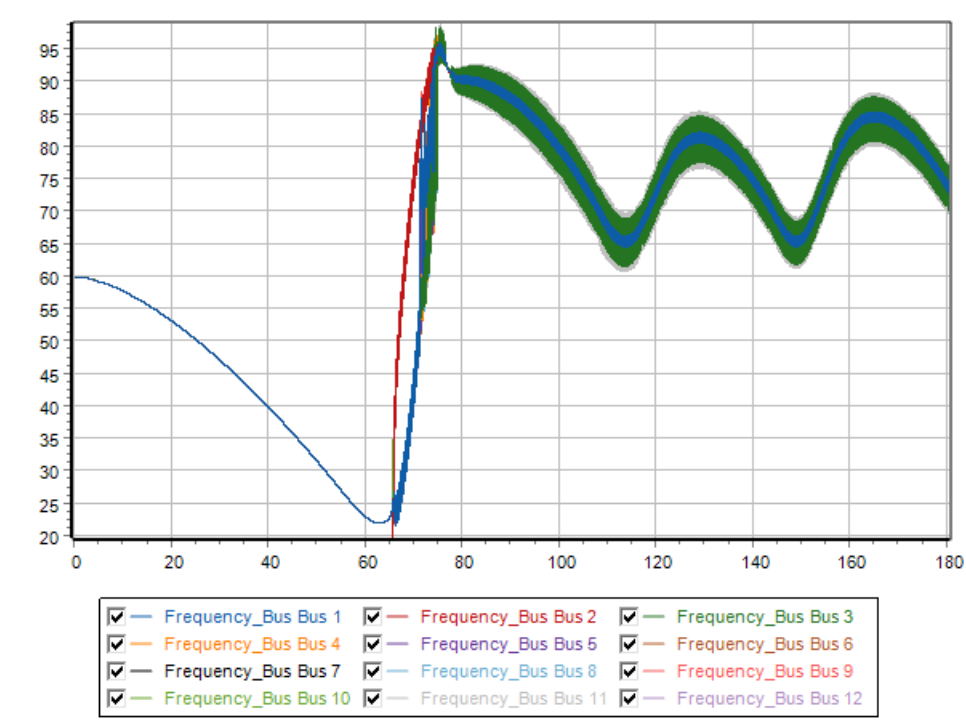
Α. Συχνότητα

Στο Σενάριο 2.1, εκτελείται η μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 33 MW. Απουσία του συστήματος V2G, η συχνότητα παρουσιάζει μεγάλη μείωση ενώ στην συνέχεια ταλαντώνεται με αρκετά μεγάλο πλάτος, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.77. Συγκριτικά με το Σενάριο 1.2, που εφαρμόζεται μείωση παραγωγής 50 MW, παρατηρούνται αρκετά μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη συχνότητα. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός παρέχει σημαντική υποστήριξη στην ευστάθεια του δικτύου και η απώλεια μιας τέτοιας πηγής μπορεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ισορροπία της συχνότητας.

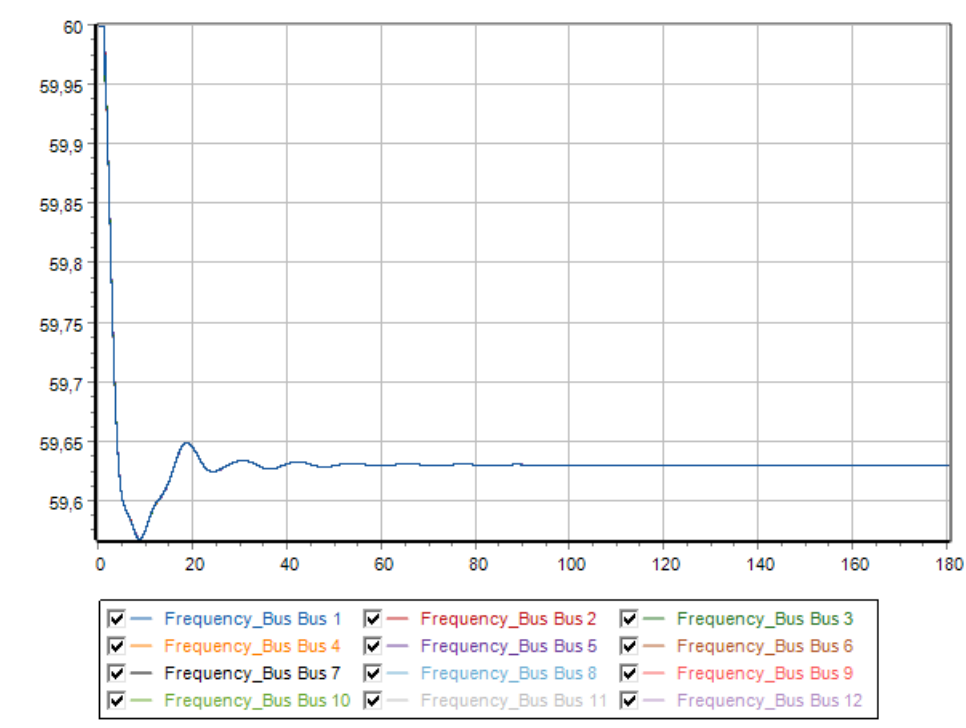
Με την ενεργοποίηση της διαδικασίας V2G, παρατηρείται ότι η συχνότητα παρουσιάζει αρχικά διακυμάνσεις, οι οποίες στη συνέχεια μειώνονται, οδηγώντας σε μία τελική τιμή ισορροπίας. Ωστόσο, παραμένει ένα μόνιμο σφάλμα στη συχνότητα. Με την κατάλληλη ρύθμιση του συντελεστή Dup, το μέγεθος του μόνιμου σφάλματος στη συχνότητα μειώνεται, βελτιώνοντας την τελική ευστάθεια του συστήματος. Οι Εικόνες 6.78, 6.79 και 6.80 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας για τιμές του συντελεστή Dup 50, 100 και 200. Η υπερβολική αύξηση του συντελεστή Dup στην τιμή 300 δεν σταθεροποιεί τη συχνότητα του συστήματος, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.81. Ο Πίνακας 6.10 συνοψίζει τα αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή Dup.

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 2.1

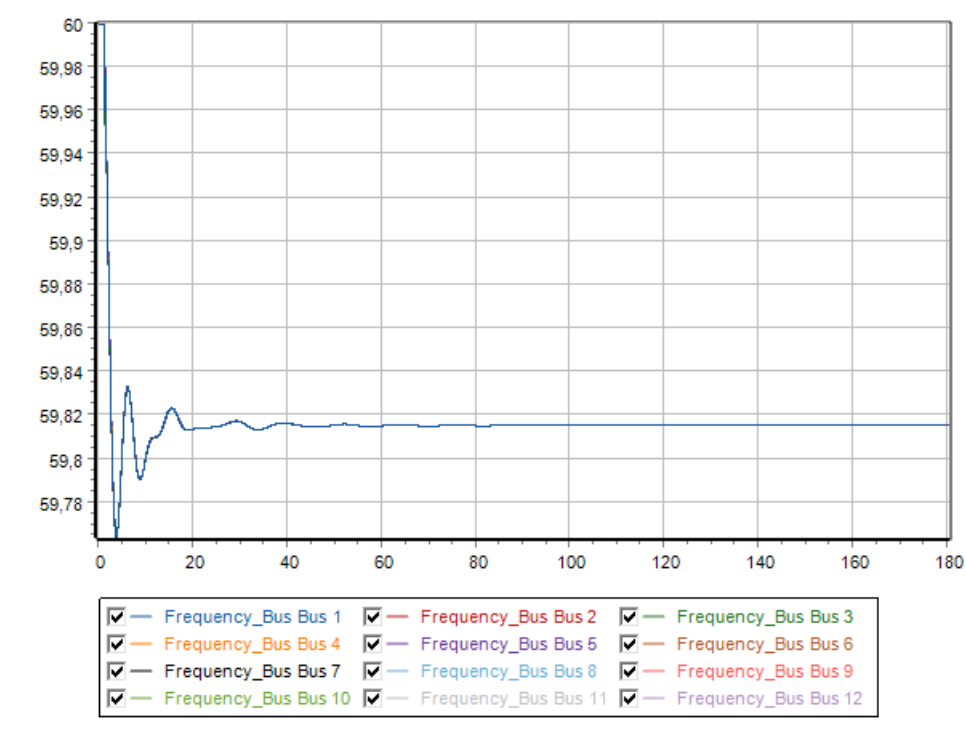
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	0.369	0.184	0.092	Ταλάντωση



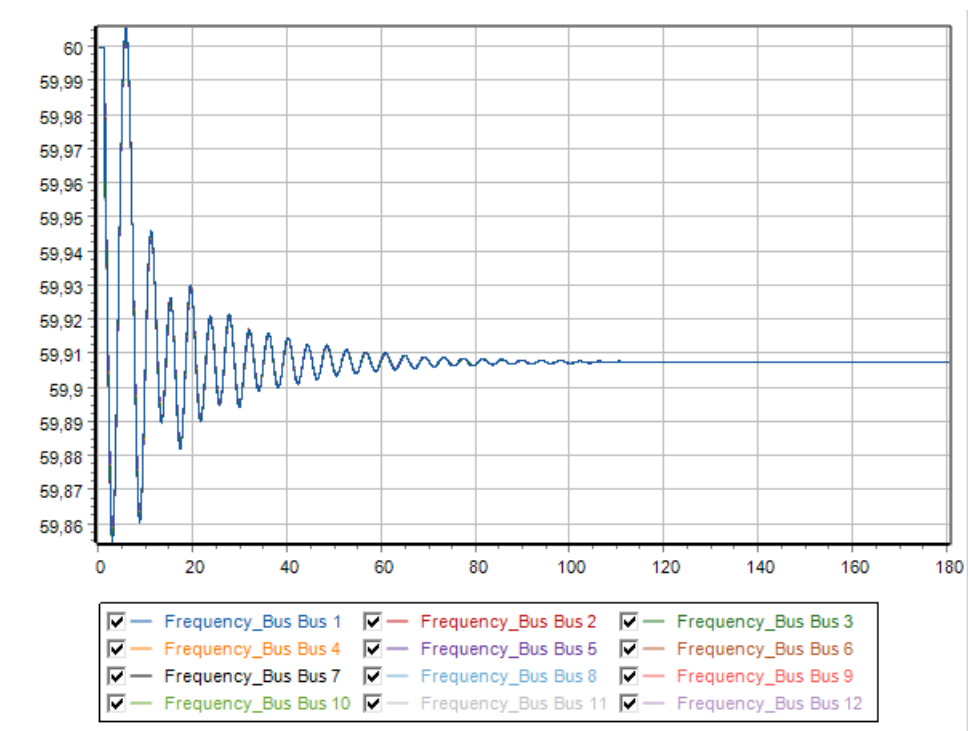
Εικόνα 6.77: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,απουσία V2G



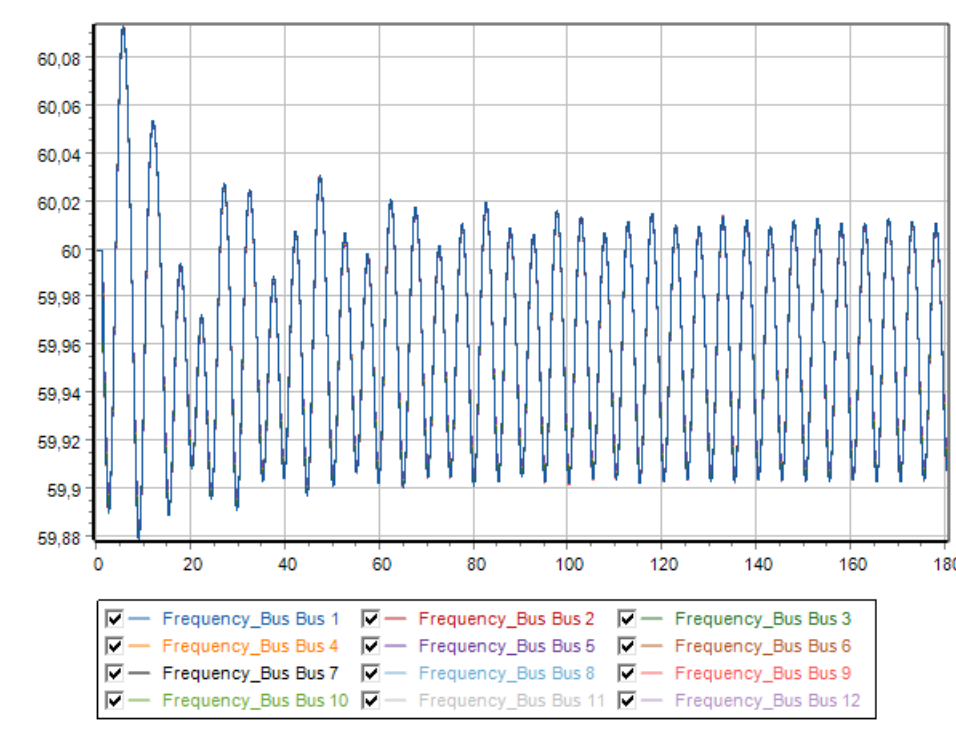
Εικόνα 6.78: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 50$



Εικόνα 6.79: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dpr} = 100$



Εικόνα 6.80: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $\text{dpr} = 200$

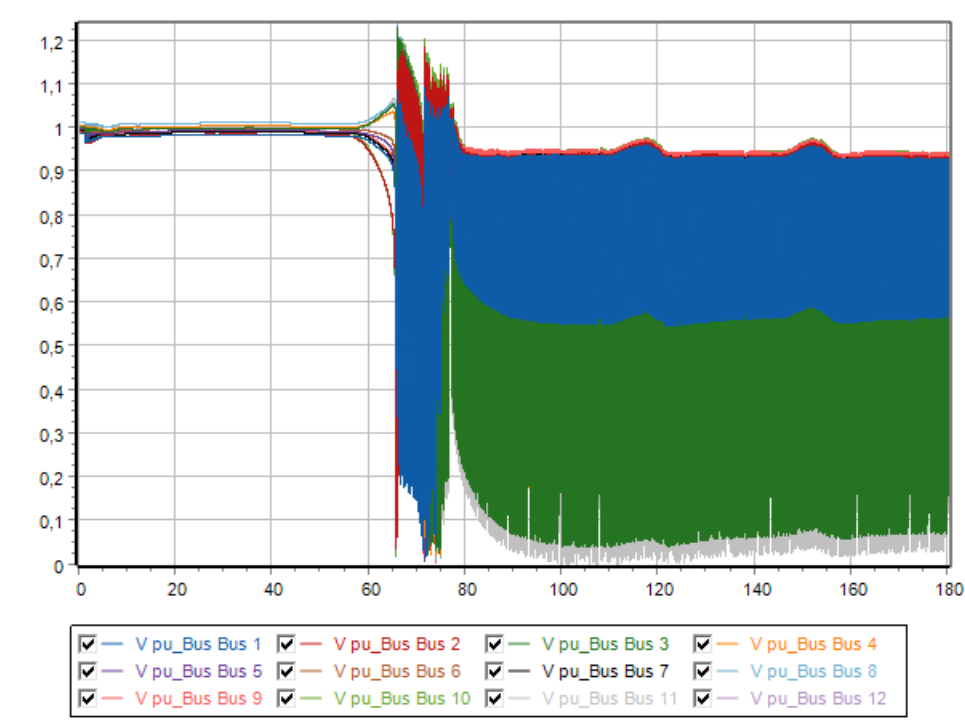


Εικόνα 6.81: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 300$

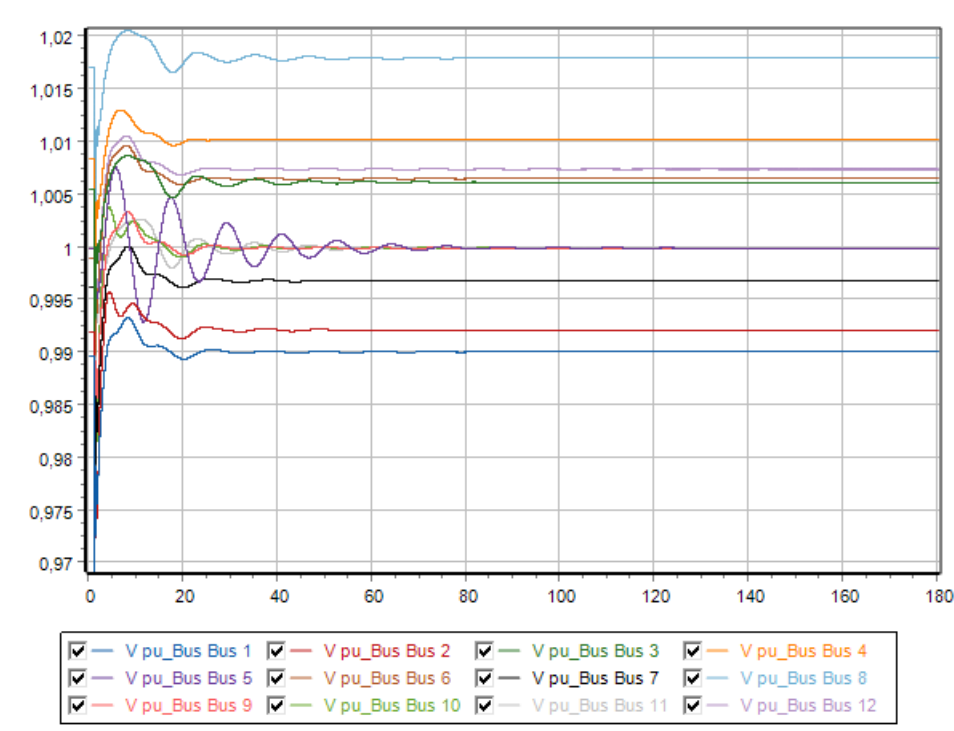
Β. Τάση

Η μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 33 MW επηρεάζει δραματικά και το μέγεθος της τάσης, η οποία ενώ σταθεροποιείται αρχικά σε αποδεκτές τιμές, με την πάροδο του χρόνου φτάνει σε κατάρρευση. Η μεταβολή της τάσης στους ζυγούς, μετά την είσοδο της διαταραχής, απουσία της V2G λειτουργίας, διαφαίνεται από το διάγραμμα στην Εικόνα 6.82.

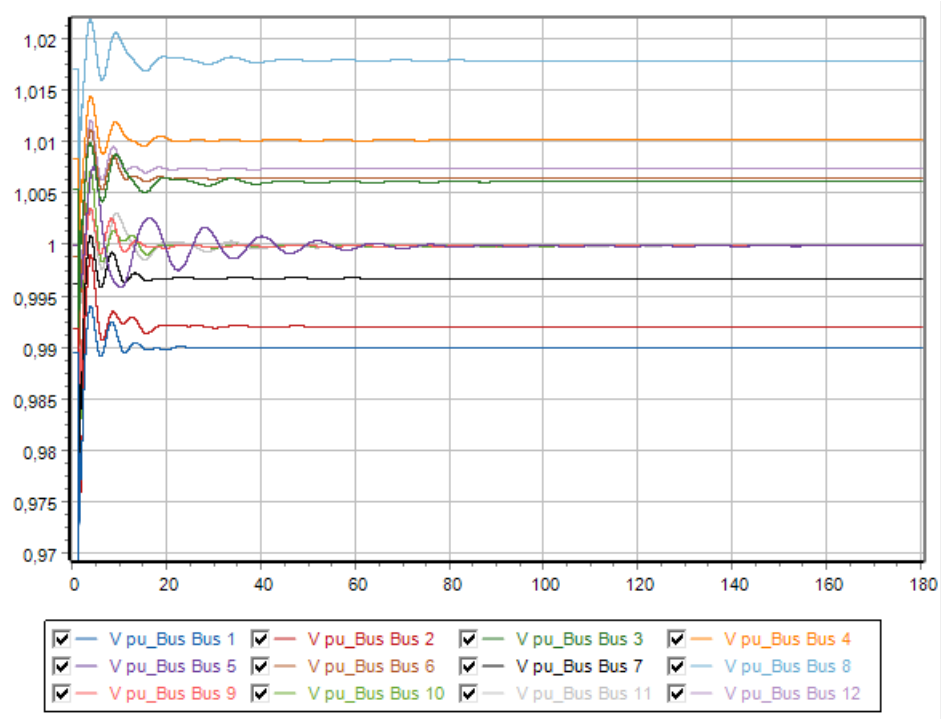
Με τη συμμετοχή της V2G, παρατηρείται ότι, ενώ η τάση παρουσιάζει μια μικρή πτώση αμέσως μετά την είσοδο της διαταραχής, επανέρχεται γρήγορα στην αρχική της τιμή για κάθε ζυγό και σταθεροποιείται για ολόκληρο τον χρόνο της προσομοίωσης, μόνο εφόσον η τιμή Dur δεν ξεπερνά ένα άνω όριο. Οι Εικόνες 6.83, 6.84 και 6.85 απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης για τιμές του συντελεστή Dur 50, 100 και 200, αντίστοιχα η οποία φτάνει τελικά σε αποκατάσταση. Η Εικόνα 6.86 απεικονίζει τη μεταβολή για τιμή του συντελεστή Dur ίση με 300 στην οποία υπάρχει διαρκής ταλάντωση.



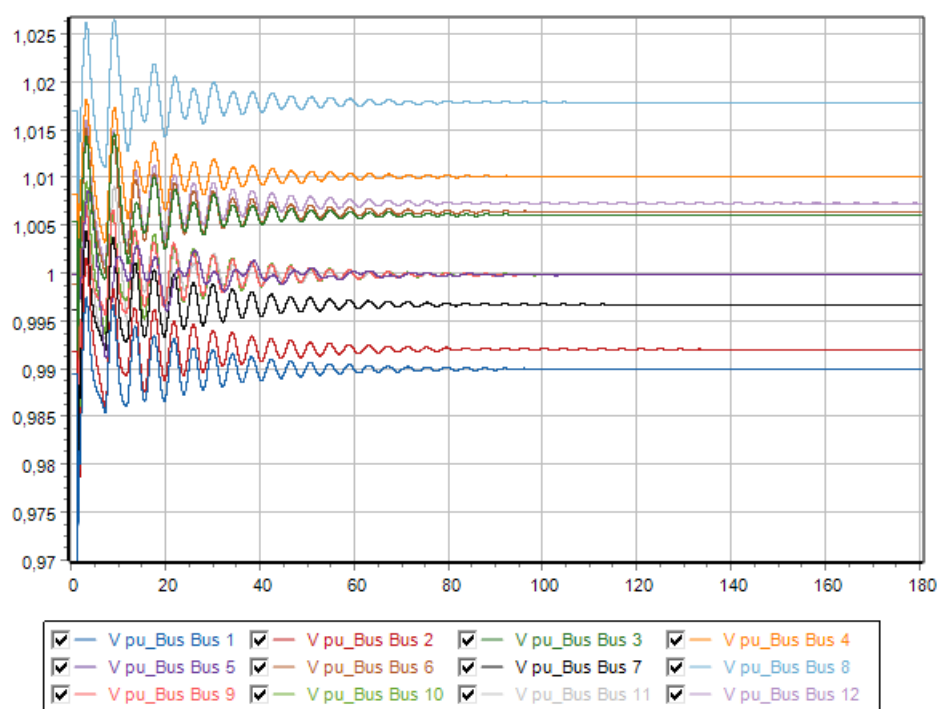
Εικόνα 6.82: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,απουσία V2G



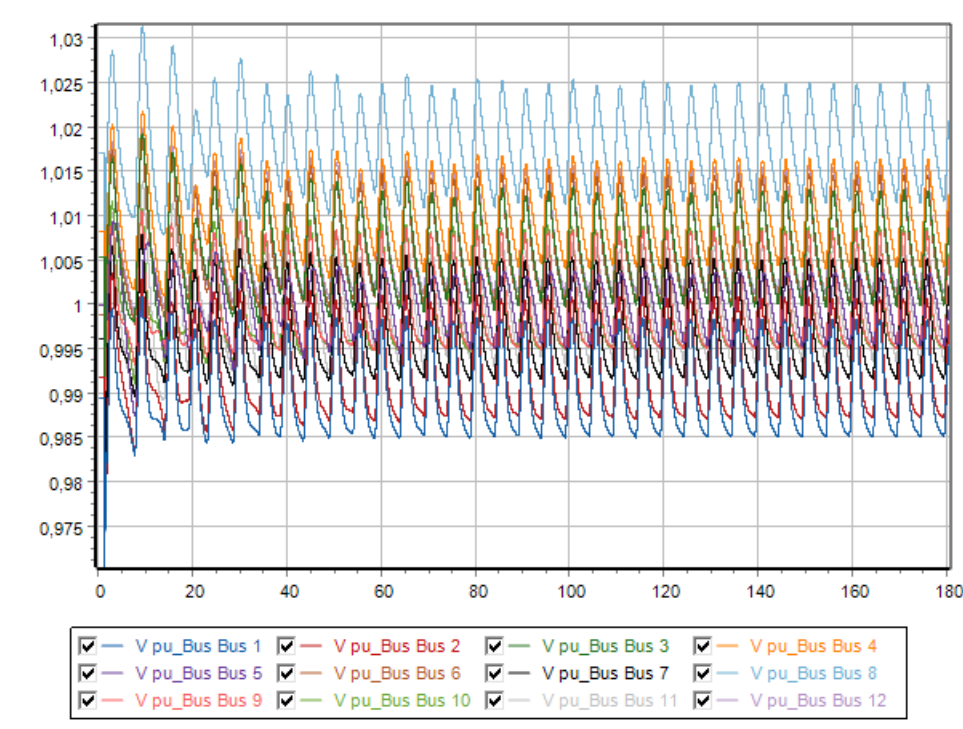
Εικόνα 6.83: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 50$



Εικόνα 6.84: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 100$



Εικόνα 6.85: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 200$



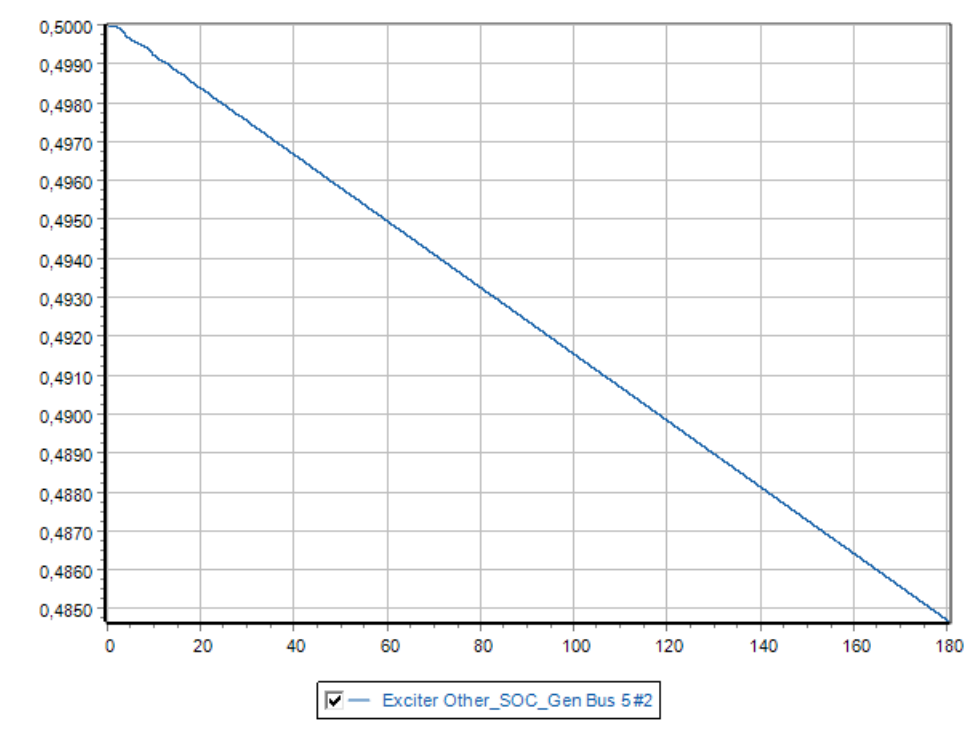
Εικόνα 6.86: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 300$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

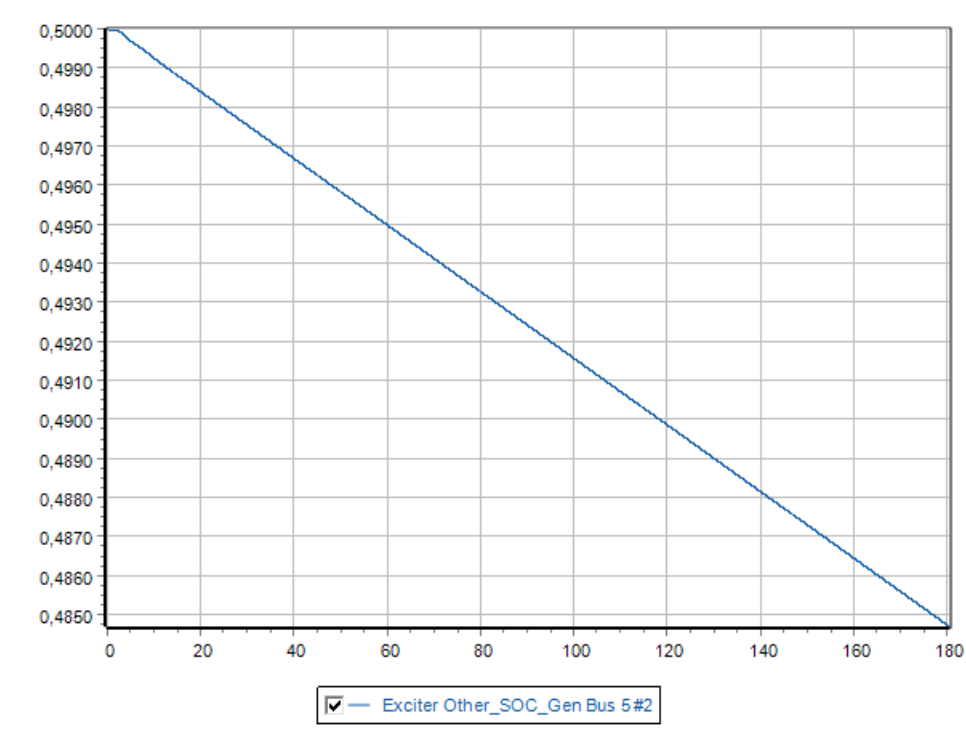
Η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης (ΔSOC) εμφανίζει μικρή περαιτέρω μείωση με την αύξηση του συντελεστή Dur . Οι Εικόνες 6.87, 6.88, 6.89 και 6.90 απεικονίζουν τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης για τιμές του συντελεστή Dur 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.11 συνοψίζει τα αποτελέσματα της μεταβολής κατάστασης φόρτισης για τις διάφορες τιμές του συντελεστή Dur .

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 2.1

Συντελεστής Dur (pu)	50	100	200	300
Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ΔSOC (%)	-1.52	-1.53	-1.535	-1.6

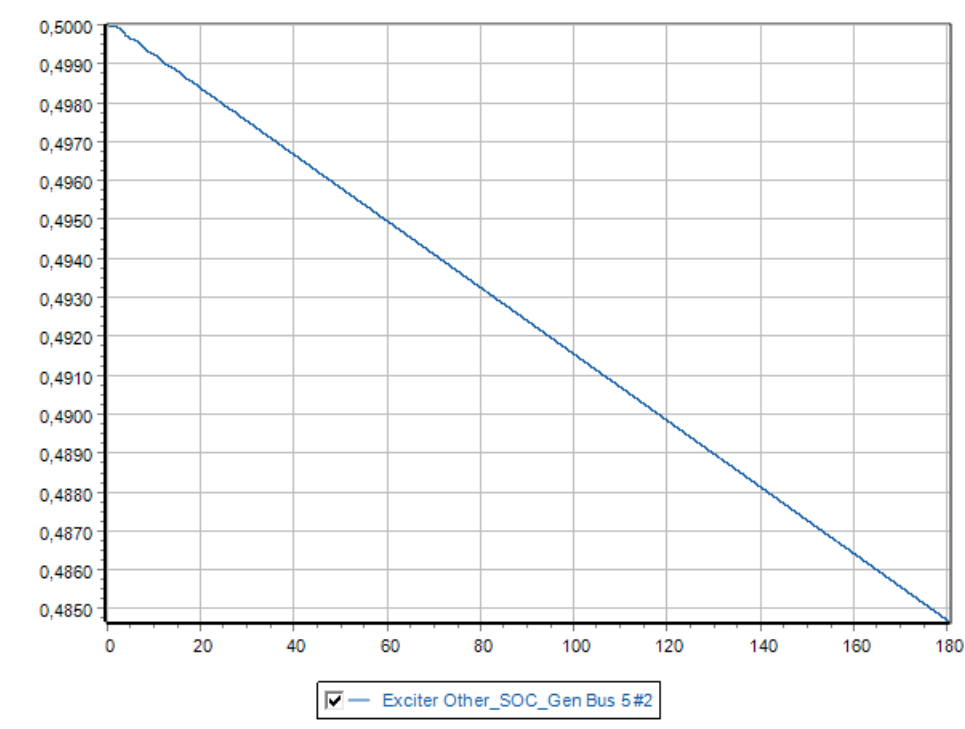


Εικόνα 6.87: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 50$

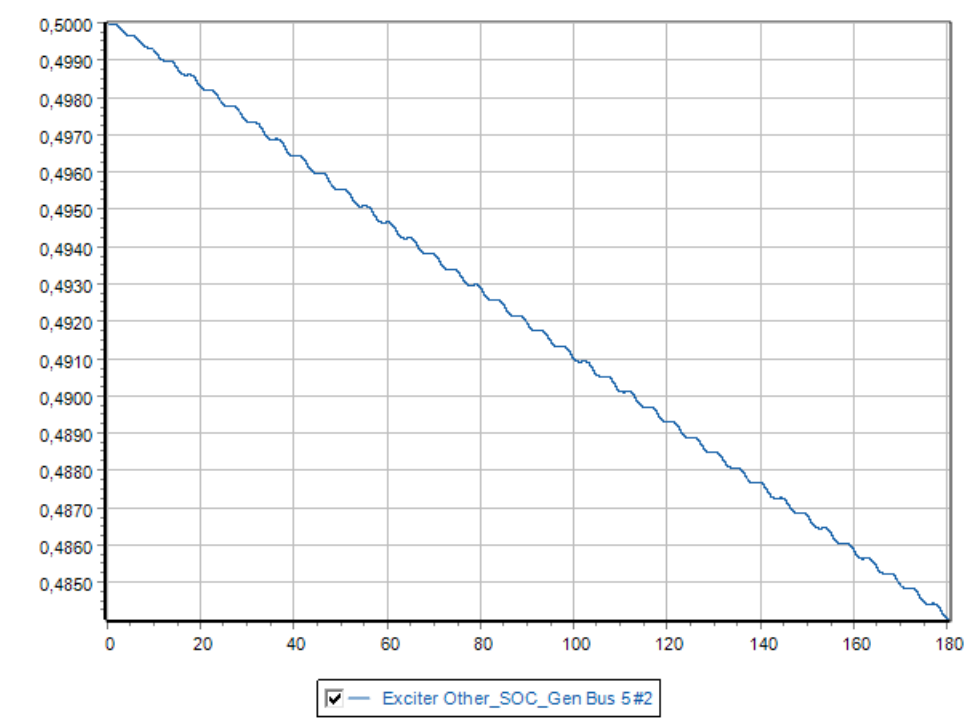


Εικόνα 6.88: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur =$

100



Εικόνα 6.89: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 200$



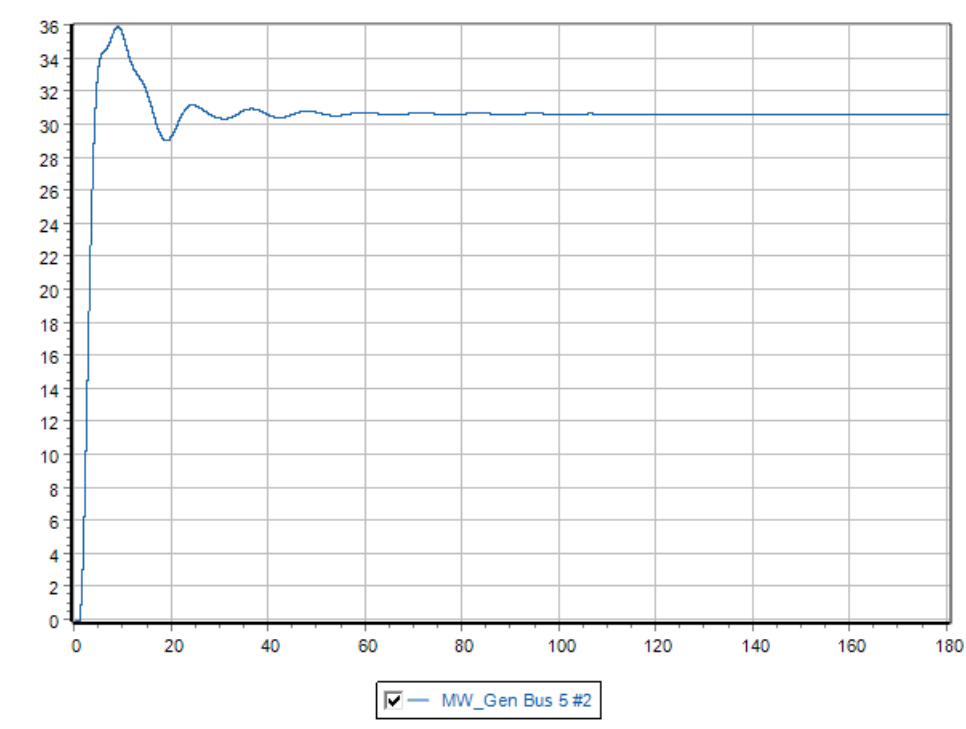
Εικόνα 6.90: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 300$

Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

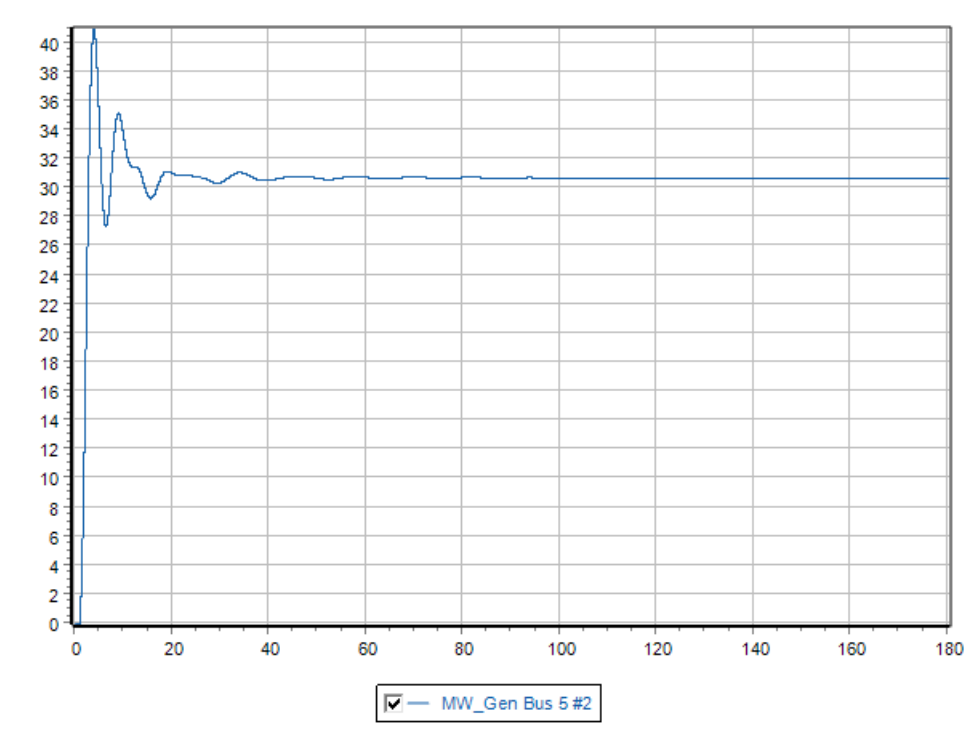
Στο συγκεκριμένο σενάριο, παρατηρείται ότι μία αύξηση στην τιμή του συντελεστή Dup επηρεάζει ελάχιστα την απόκριση πραγματικής και αέργου ισχύος. Οι Εικόνες 6.91, 6.92, 6.93 και 6.94 απεικονίζουν την ενεργό ισχύ για τιμές Dup 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα. Οι Εικόνες 6.95, 6.96, 6.97 και 6.98 απεικονίζουν την άεργο ισχύ για τις ίδιες τιμές του συντελεστή Dup. Παρατηρείται ότι για κάθε τιμή Dup μικρότερη από ένα άνω όριο των 300 pu η τελική απόκριση του συστήματος έχει την ίδια τιμή, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.12. Επομένως, ο συντελεστής Dup μπορεί να επηρεάζει την απόκριση του συστήματος, αλλά η επίδραση αυτή δεν είναι πάντα άμεση στις τιμές πραγματικής και αέργου ισχύος.

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα μεταβολής κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 2.1

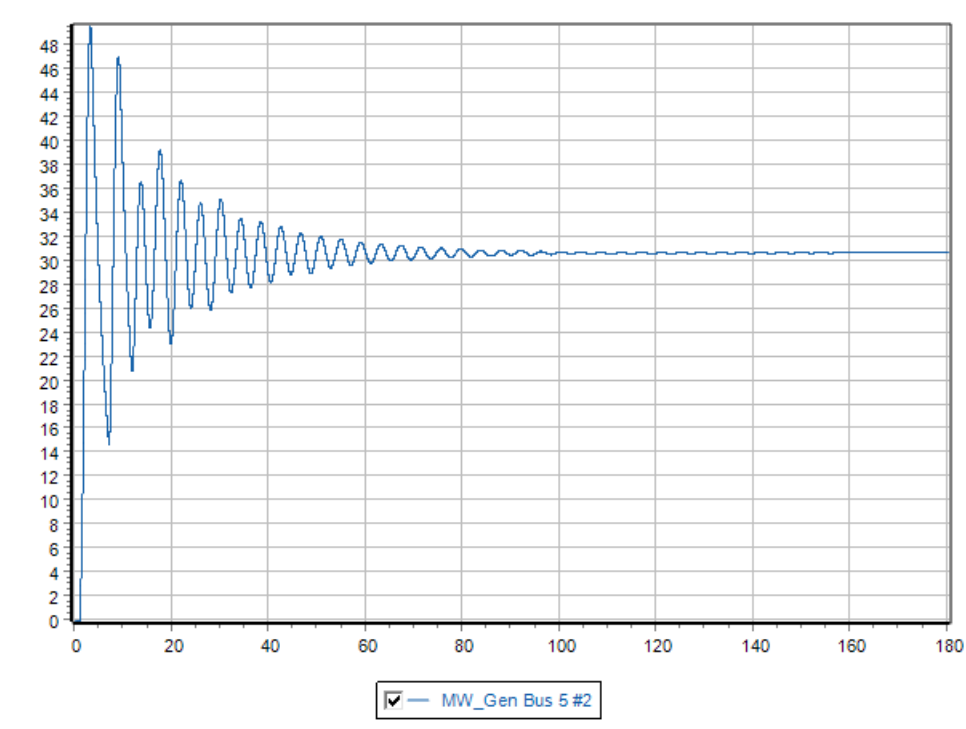
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300
Πραγματική Ισχύς εξόδου (MW)	30.71	30.71	30.71	Ταλάντωση
Άεργος Ισχύς εξόδου (MVAR)	-20.37	-20.37	-20.37	Ταλάντωση



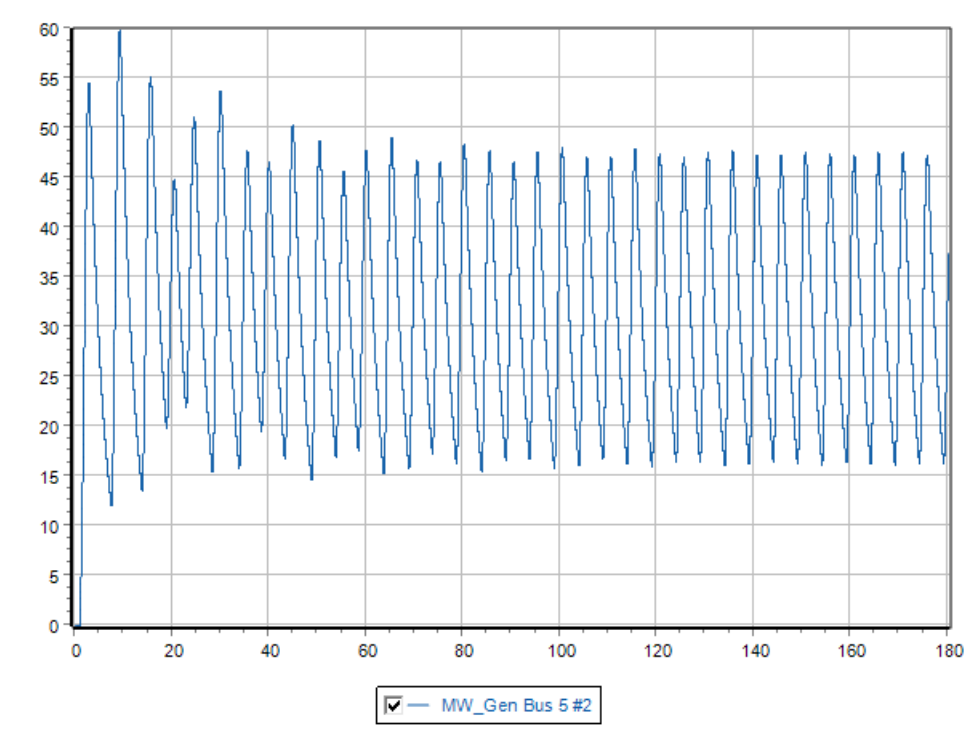
Εικόνα 6.91: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 50$



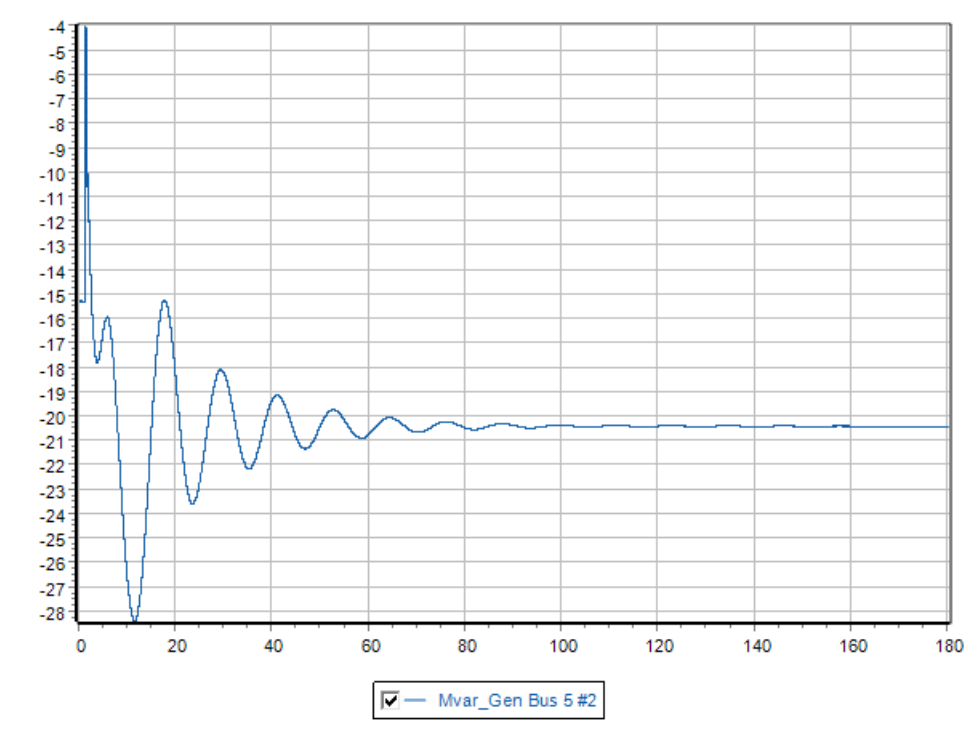
Εικόνα 6.92: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 100$



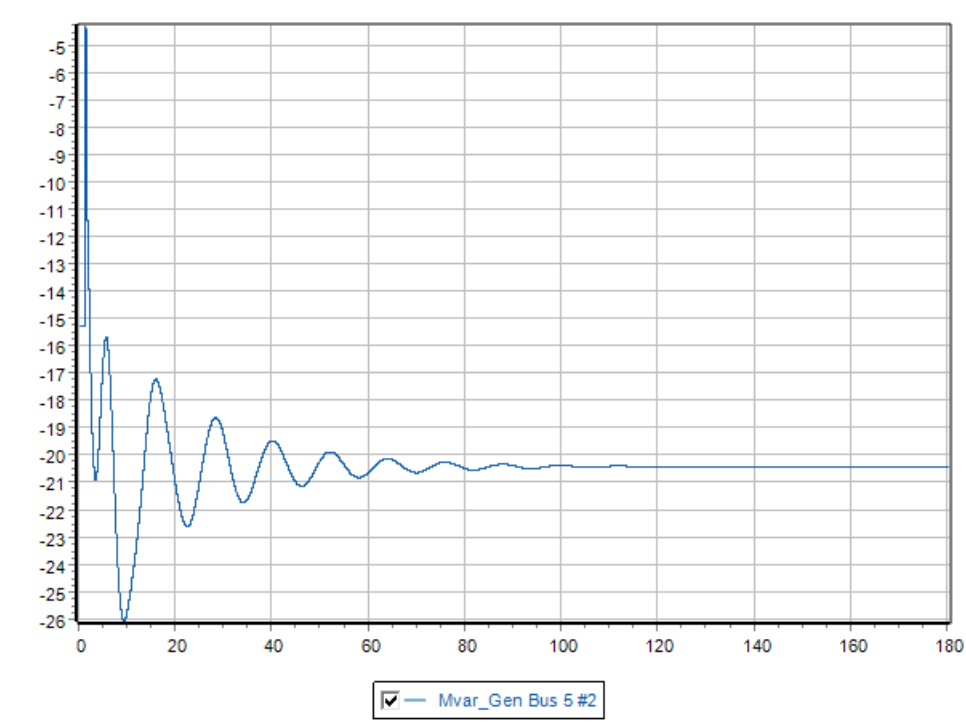
Εικόνα 6.93: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 200$



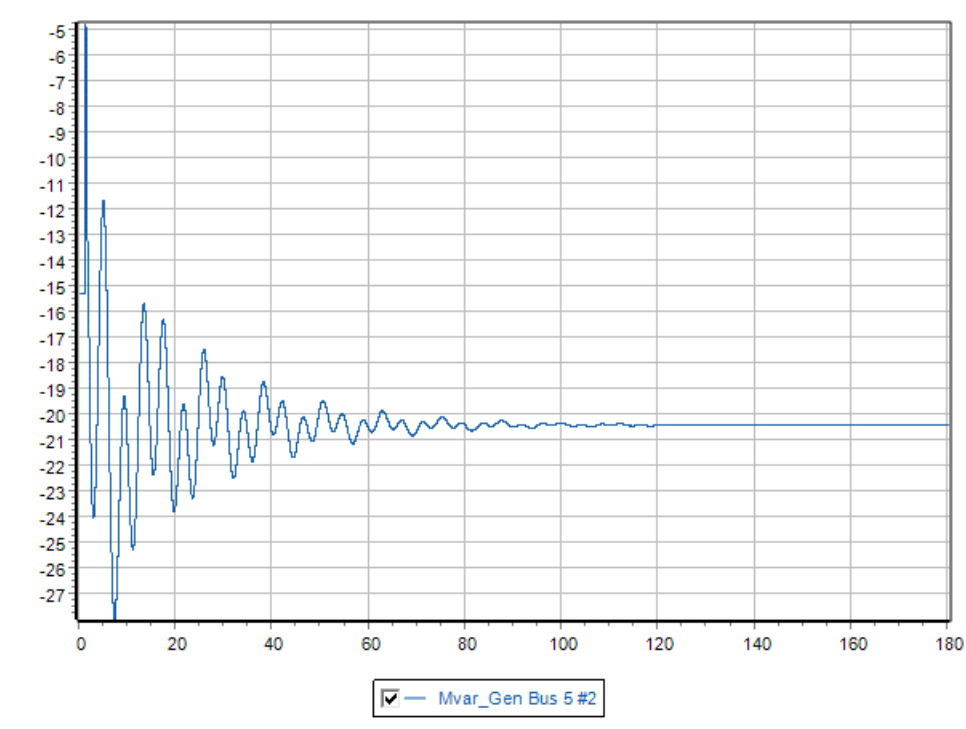
Εικόνα 6.94: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dur = 300$



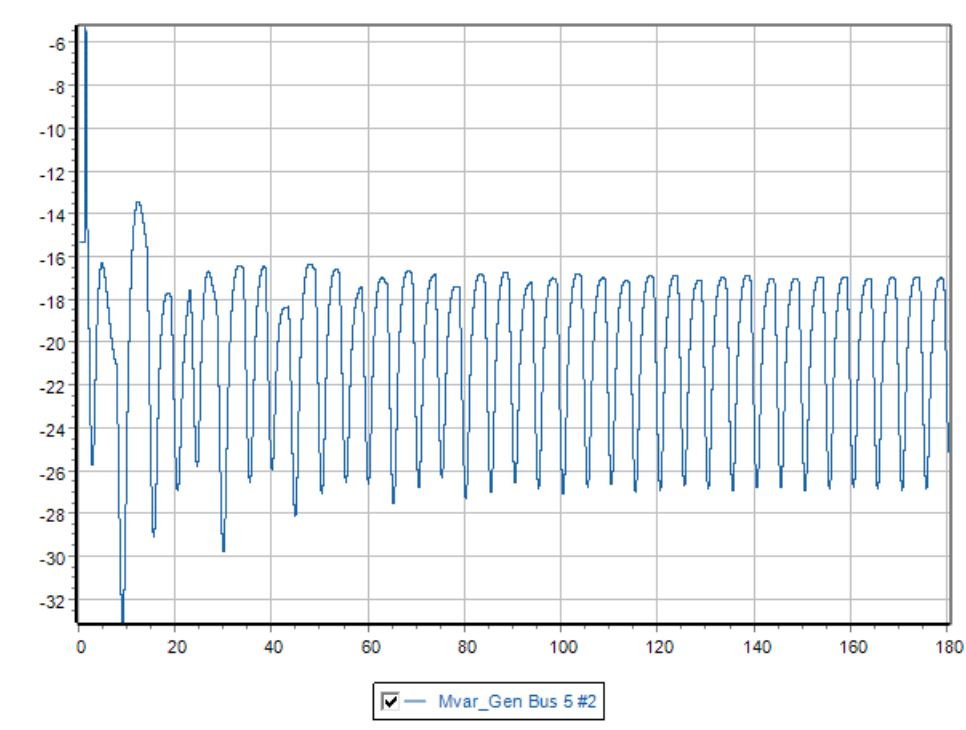
Εικόνα 6.95: Αεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10% ,παρουσία V2G με $dup = 50$



Εικόνα 6.96: Αεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10%, παρουσία V2G με $dup = 100$



Εικόνα 6.97: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 200$



Εικόνα 6.98: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού κατά 10%, παρουσία V2G με $dur = 300$

Σενάριο 3: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στους ζυγούς φορτίων (V2G)

Στο Σενάριο 3, εξετάζονται ορισμένες περιπτώσεις όπου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια ξεπερνά την παραγωγική ικανότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το σύστημα V2G (Vehicle-to-Grid) ενεργοποιείται με στόχο την υποστήριξη της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών και τη διαχείριση των αιχμών ζήτησης.

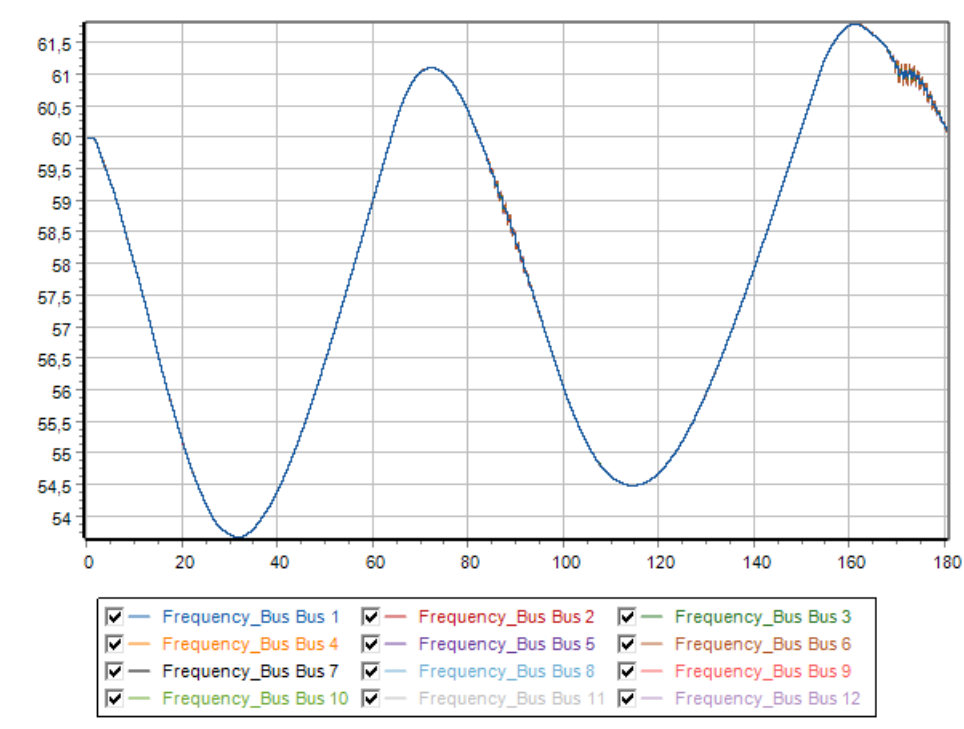
Σενάριο 3.1: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% (50 MW)

Α. Συχνότητα

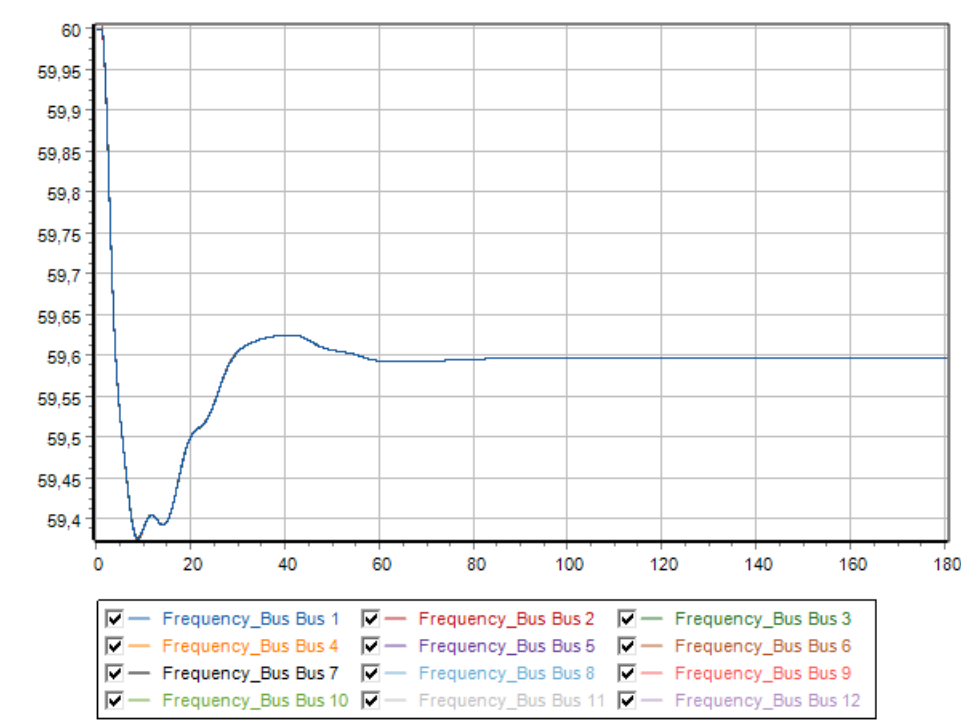
Στο Σενάριο 3.1, εξετάζεται η αύξηση της ζήτησης φορτίου στον ζυγό 2 κατά 50 MW, μια αλλαγή ισοδύναμη με την διαταραχή που μελετήθηκε στο Σενάριο 1.2. Οι Εικόνες 6.99, 6.100, 6.101 και 6.102 φανερώνουν την μεταβολή της συχνότητας για Dup 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα για τιμές του συντελεστή Dup ίσες με 50, 100 και 200 παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του Σεναρίου 3.1 και του Σεναρίου 1.2 είναι μικρές. Αυτό υποδηλώνει ότι η ικανότητα του συστήματος V2G να διαχειριστεί τις αυξήσεις ζήτησης είναι παρόμοια με την ικανότητά του να αποκαταστήσει τη συχνότητα μετά από μείωση της παραγωγής. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές Dup 300,400 και 500, στο Σενάριο 3.1 αποκαθίσταται ταχύτερα η ισορροπία στη συχνότητα. Οι Εικόνες 6.103, 6.104 και 6.105 απεικονίζουν την μεταβολή της συχνότητας για τιμές Dup 300,400 και 500, αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση, ο Πίνακας 6.13 συνοψίζει τις τιμές του μόνιμου σφάλματος συχνότητας.

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 3.1

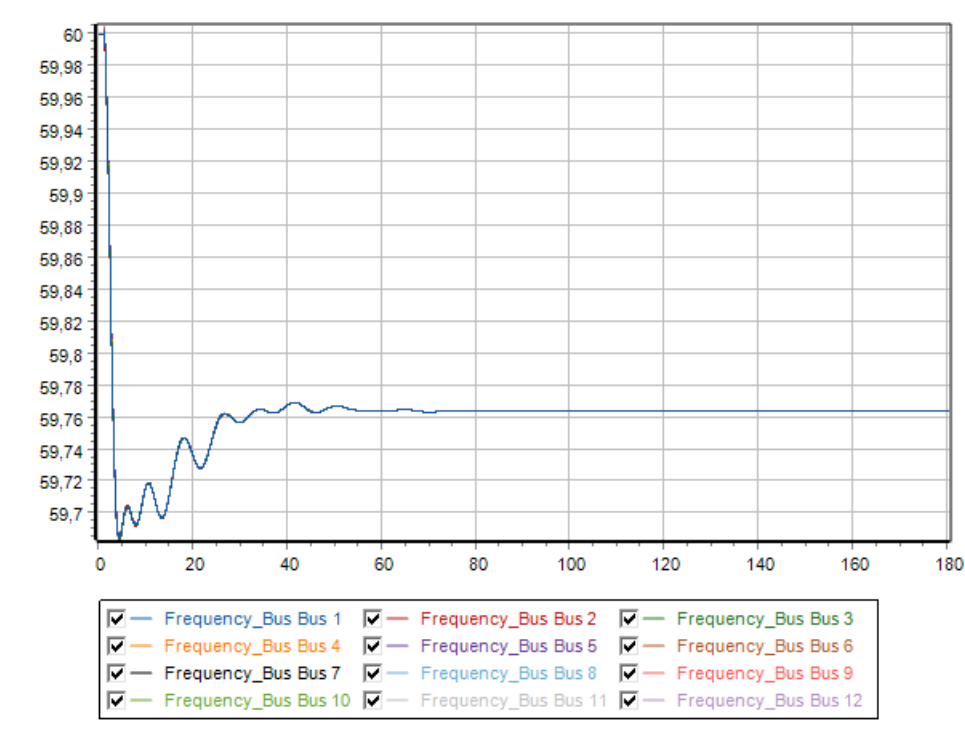
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400	500
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	0.4	0.239	0.13	0.09	0.07	0.055



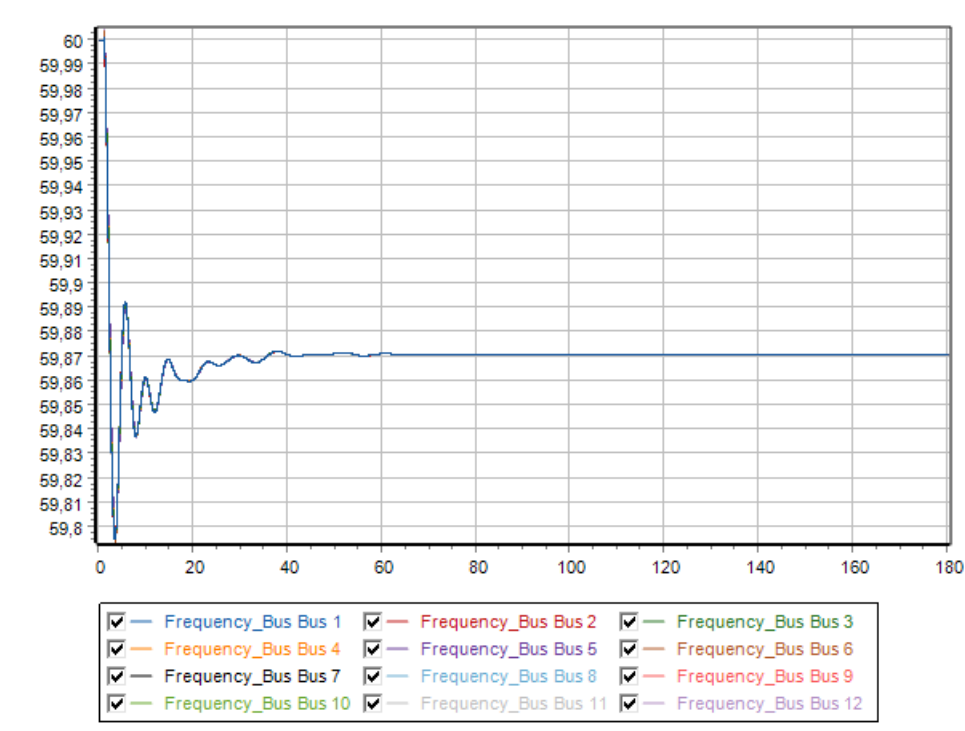
Εικόνα 6.99: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία V2G



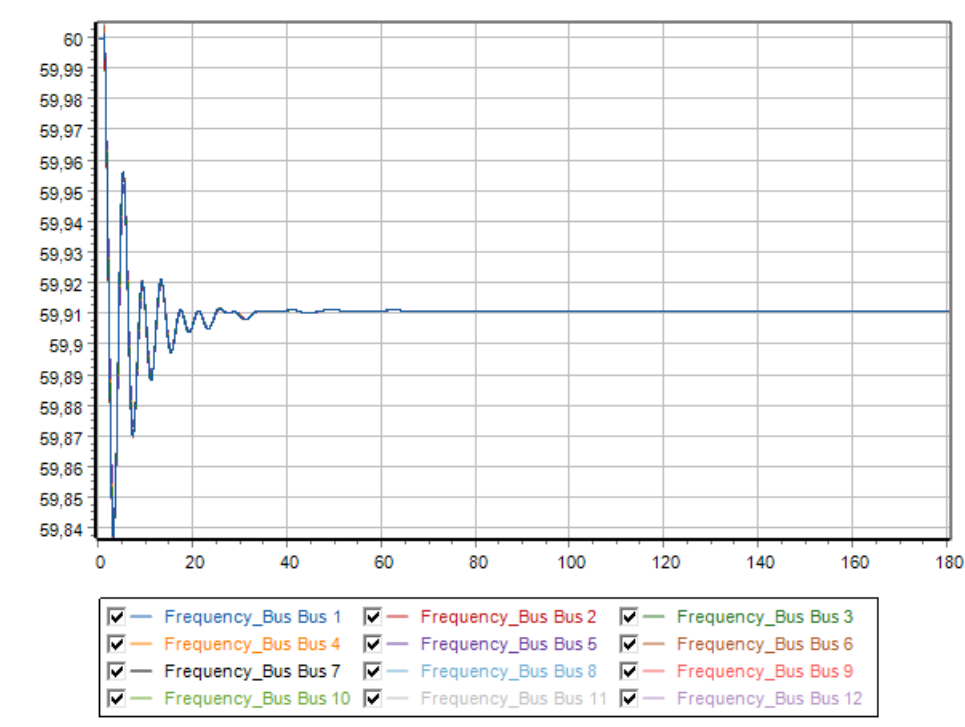
Εικόνα 6.100: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G $dur = 50$



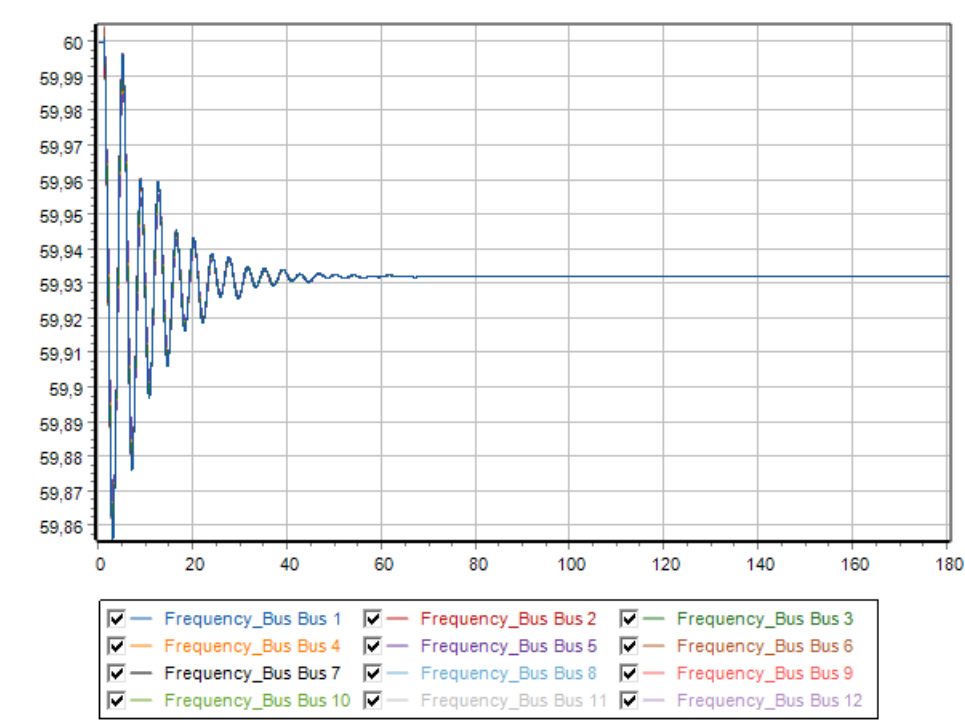
Εικόνα 6.101: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με $dup = 100$



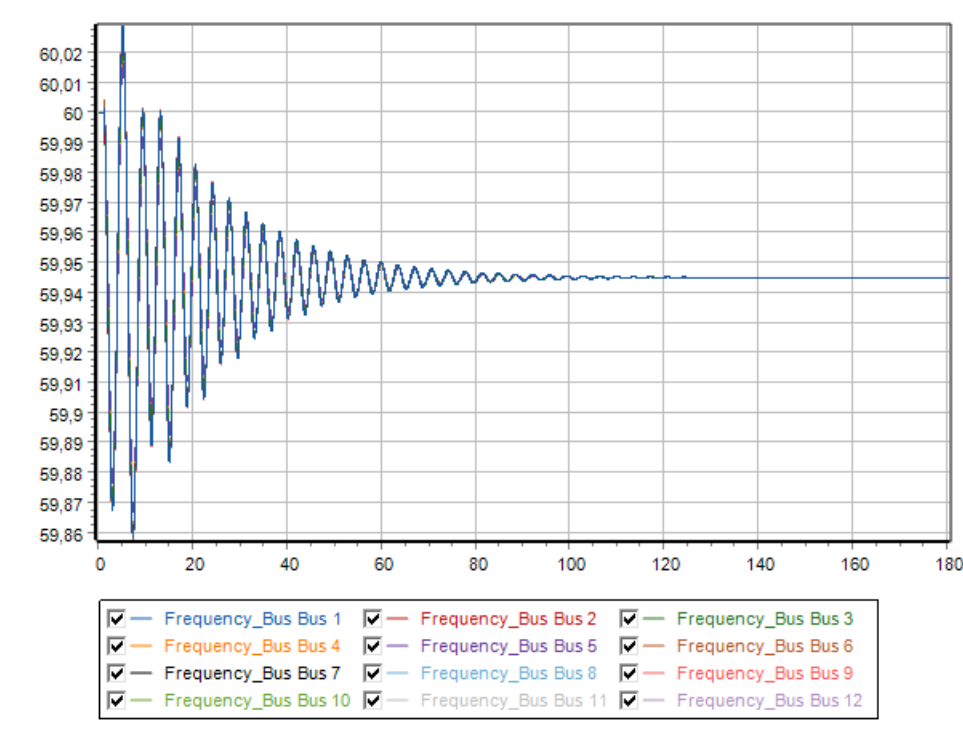
Εικόνα 6.102: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με $dup = 200$



Εικόνα 6.103: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με $dur = 300$



Εικόνα 6.104: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με $dur = 400$

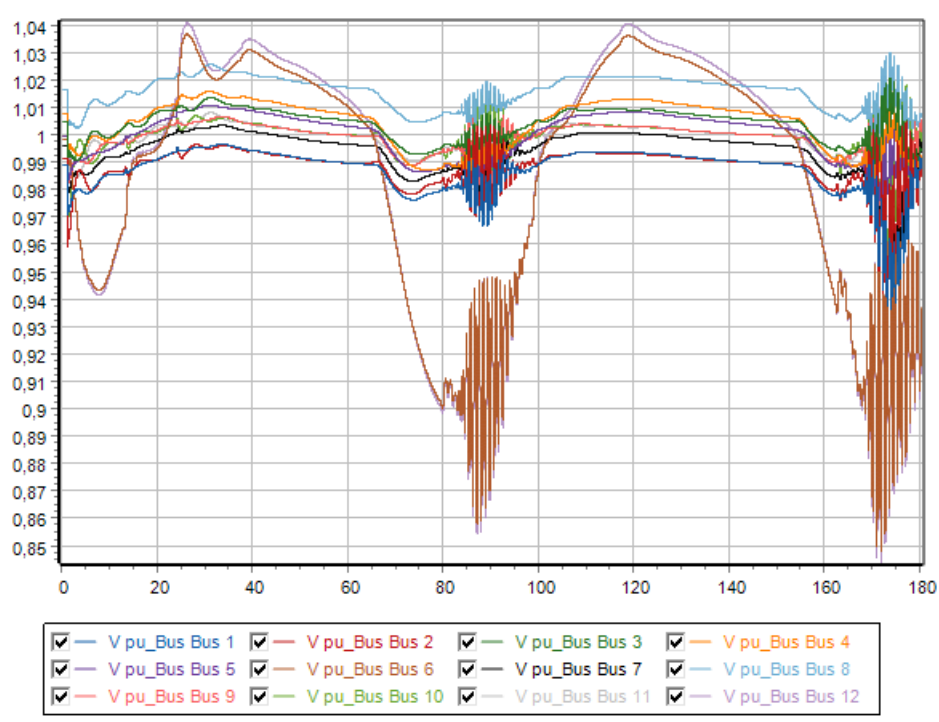


Εικόνα 6.105: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία V2G με $dur = 500$

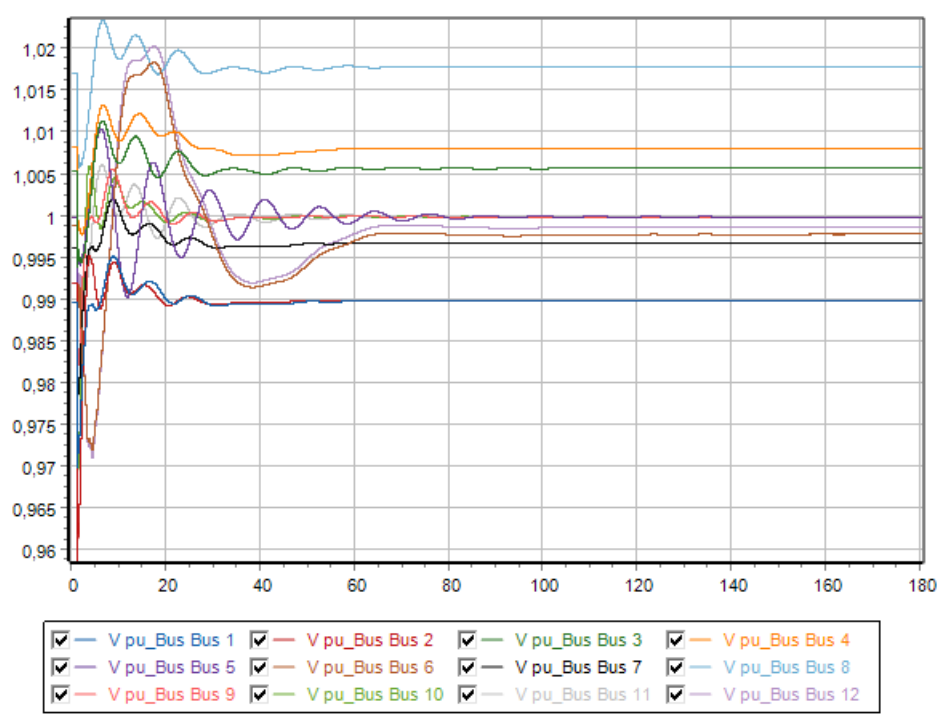
B. Τάση

Παρόμοια, εξετάζοντας τα γραφήματα τάσης πριν και μετά την συμμετοχή V2G για διαφορετικές τιμές του συντελεστή Dur 50, 100 και 200, παρατηρείται ότι αποκλίσεις μεταξύ των εκείνων του Σεναρίου 3.1 και του Σεναρίου 1.2 είναι ελάχιστες. Η Εικόνα 6.106 απεικονίζει τη μεταβολή της τάσης απουσία V2G λειτουργίας. Οι Εικόνες 6.107, 6.108 και 6.109 απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης παρουσία V2G για Dur 50, 100 και 200, αντίστοιχα.

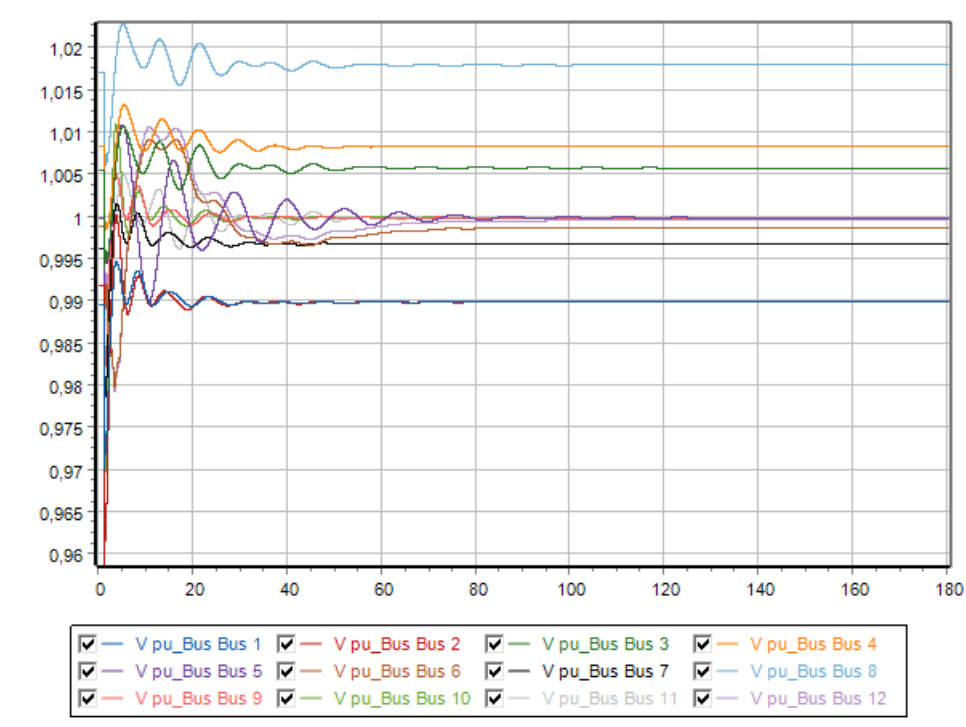
Όμως, παρατηρείται ότι στο Σενάριο 3.1, η αποκατάσταση της ισορροπίας στις τάσεις των ζυγών είναι ταχύτερη για τιμές του συντελεστή Dur 300, 400 και 500. Οι Εικόνες 6.110, 6.111 και 6.112 απεικονίζουν την μεταβολή της τάσης για αυτές τις τιμές του συντελεστή Dur .



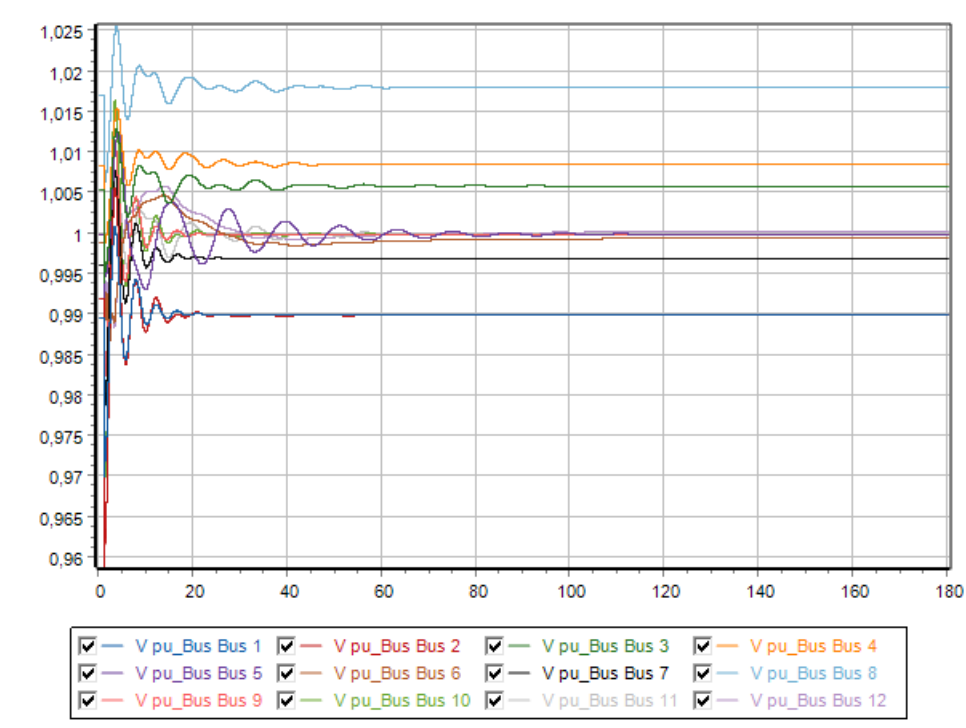
Εικόνα 6.106: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία V2G



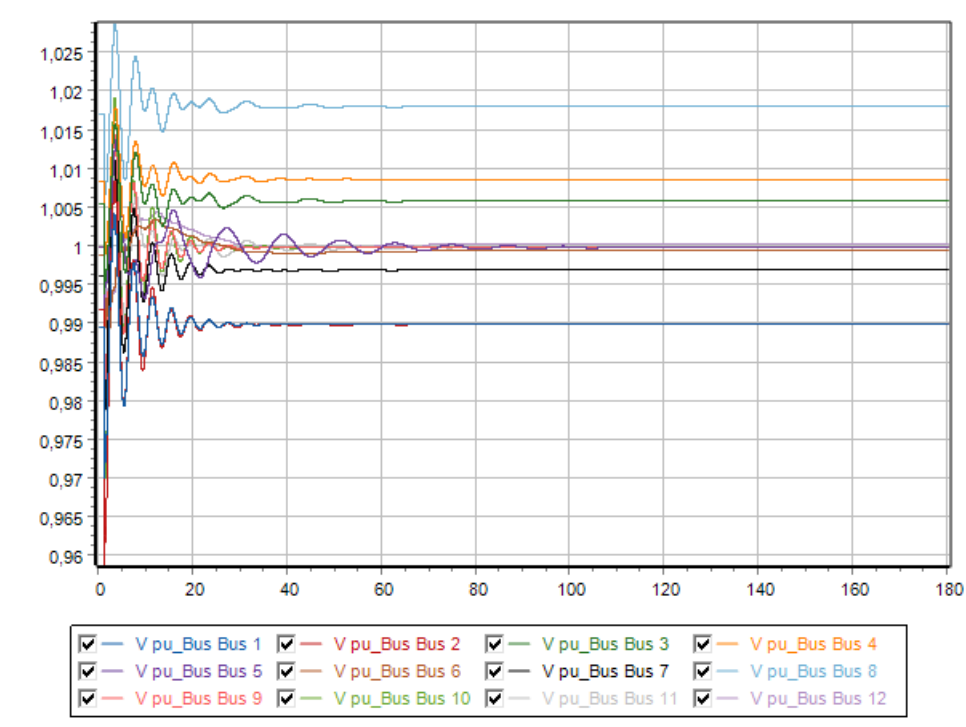
Εικόνα 6.107: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 50$



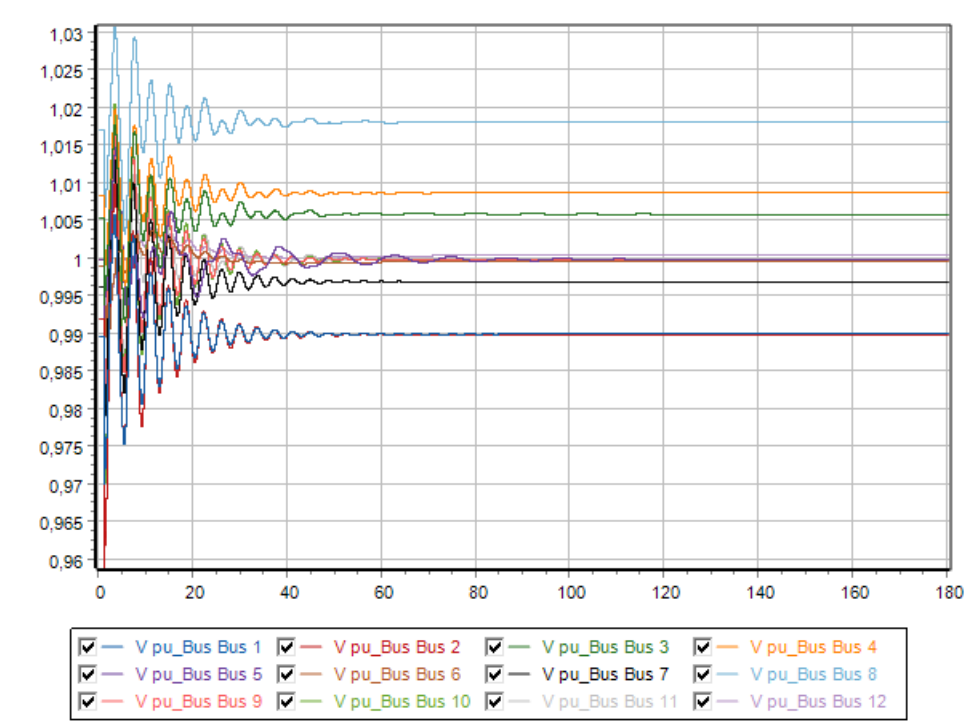
Εικόνα 6.108: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 100$



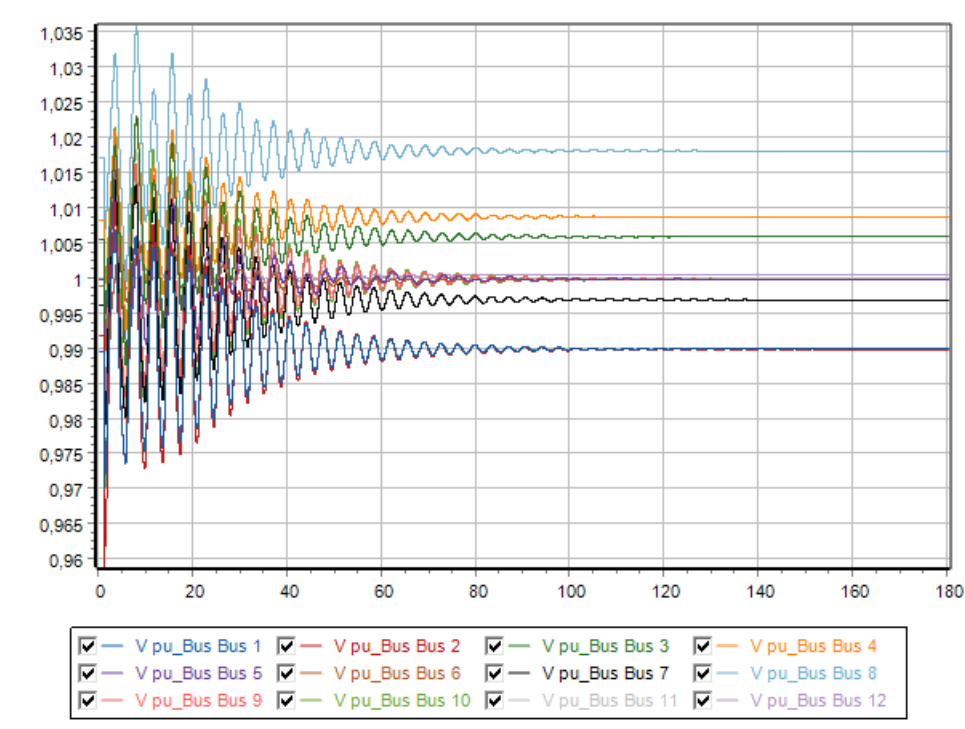
Εικόνα 6.109: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 200$



Εικόνα 6.110: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 300$



Εικόνα 6.111: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 400$



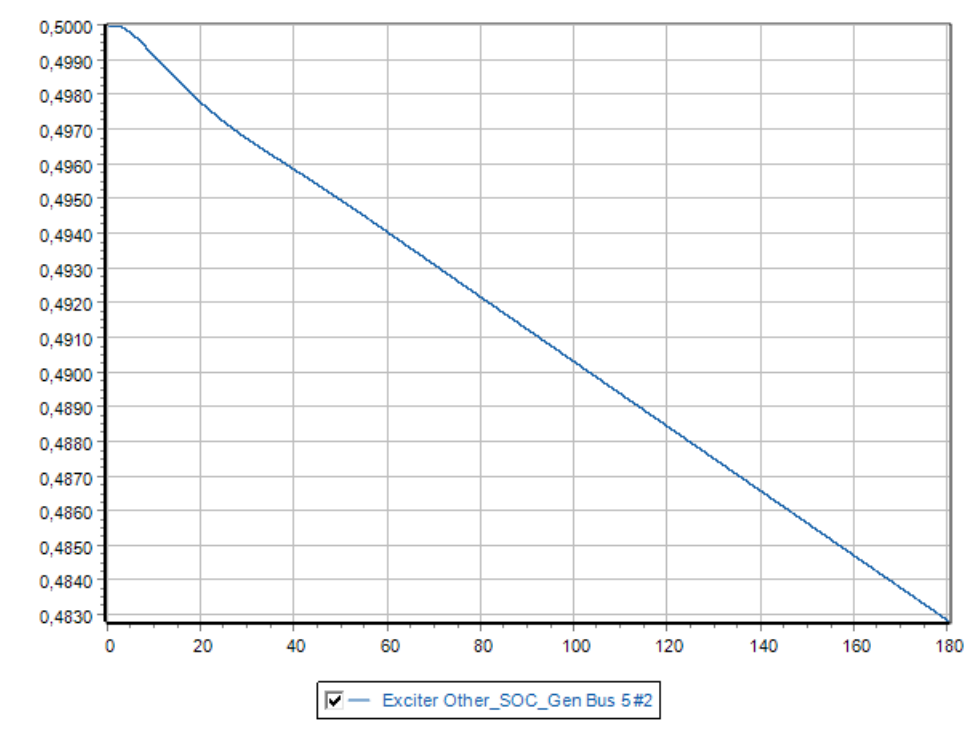
Εικόνα 6.112: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 500$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

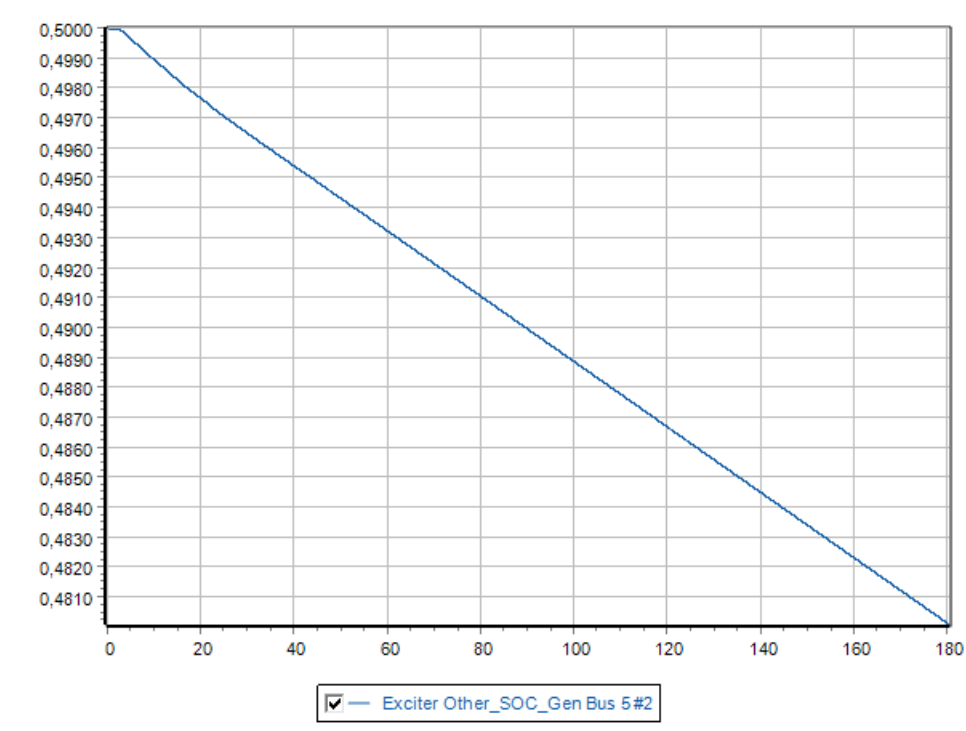
Η μείωση της ποσοστιαίας κατάστασης φόρτισης κλιμακώνεται αργά με την αύξηση του συντελεστή Dur . Ο Πίνακας 6.14 συνοψίζει τα αποτελέσματα για τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης η οποία διαπιστώνεται από τις Εικόνες 6.113, 6.114, 6.115, 6.116, 6.117 και 6.118 για τους συντελεστές Dur 50, 100, 200, 300, 400 και 500, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 3.1

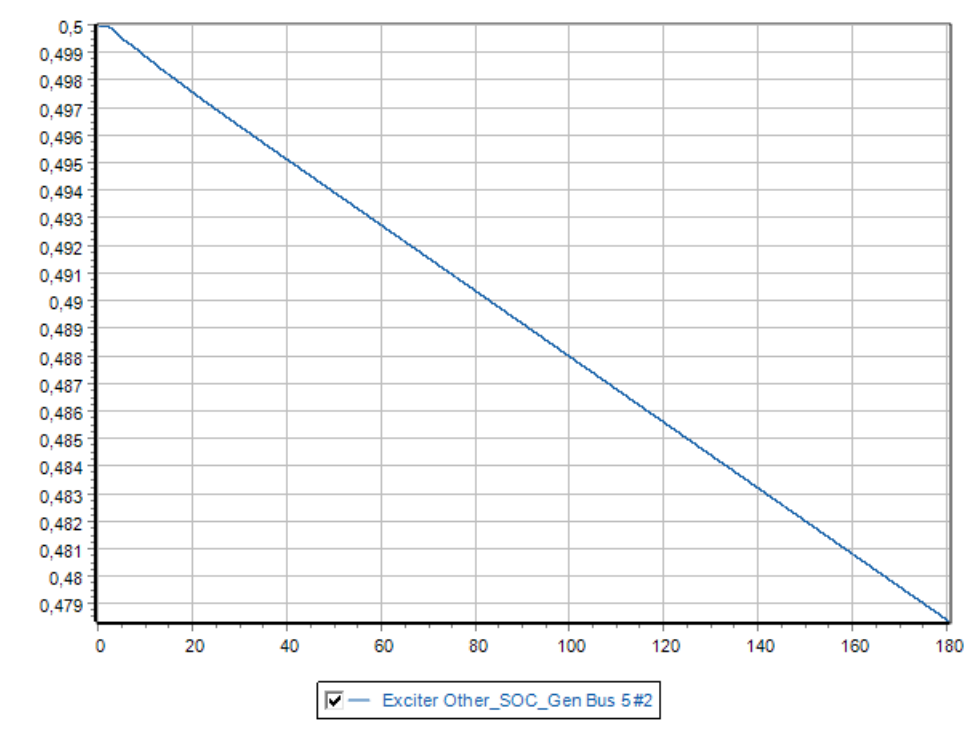
Συντελεστής Dur (pu)	50	100	200	300	400	500
Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ΔSOC (%)	-1.72	-1.98	-2.2	-2.25	-2.3	-2.35



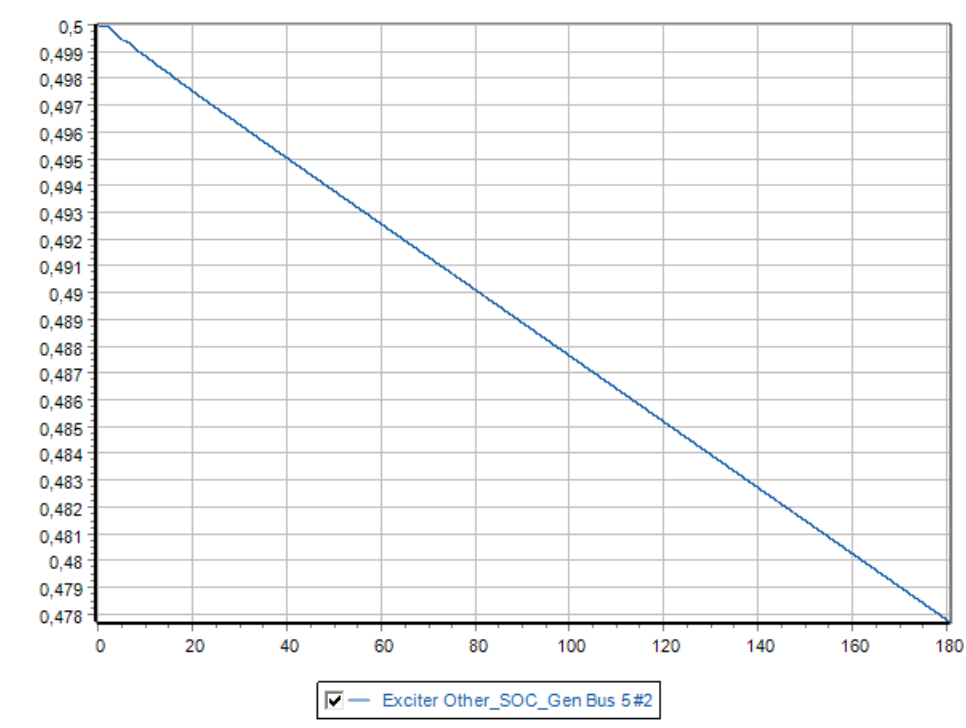
Εικόνα 6.113: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 50$



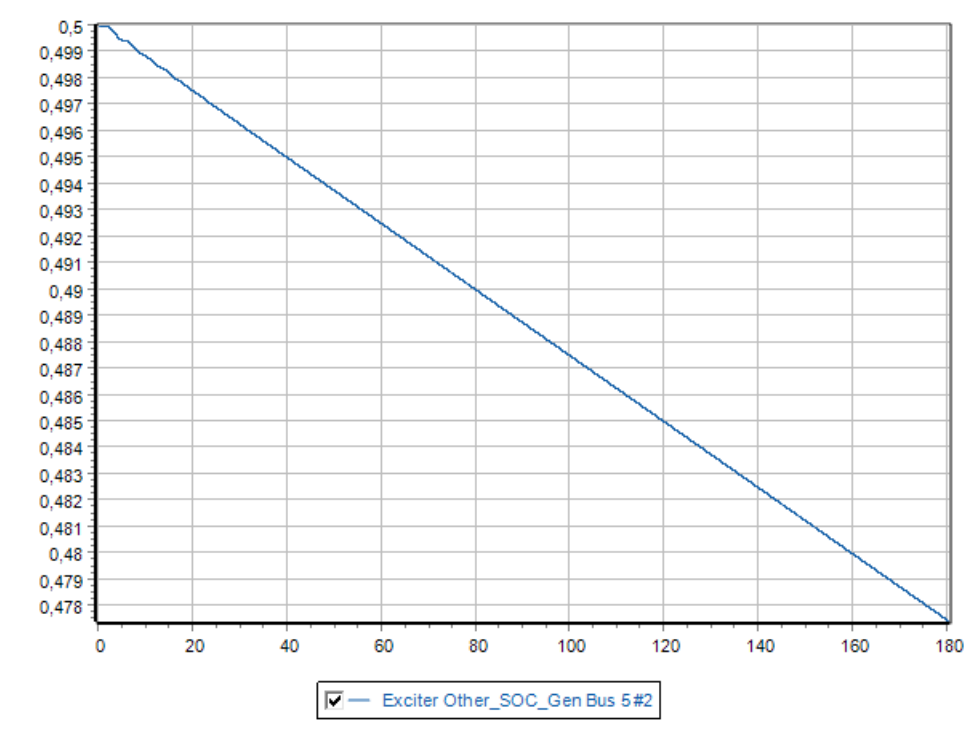
Εικόνα 6.114: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 100$



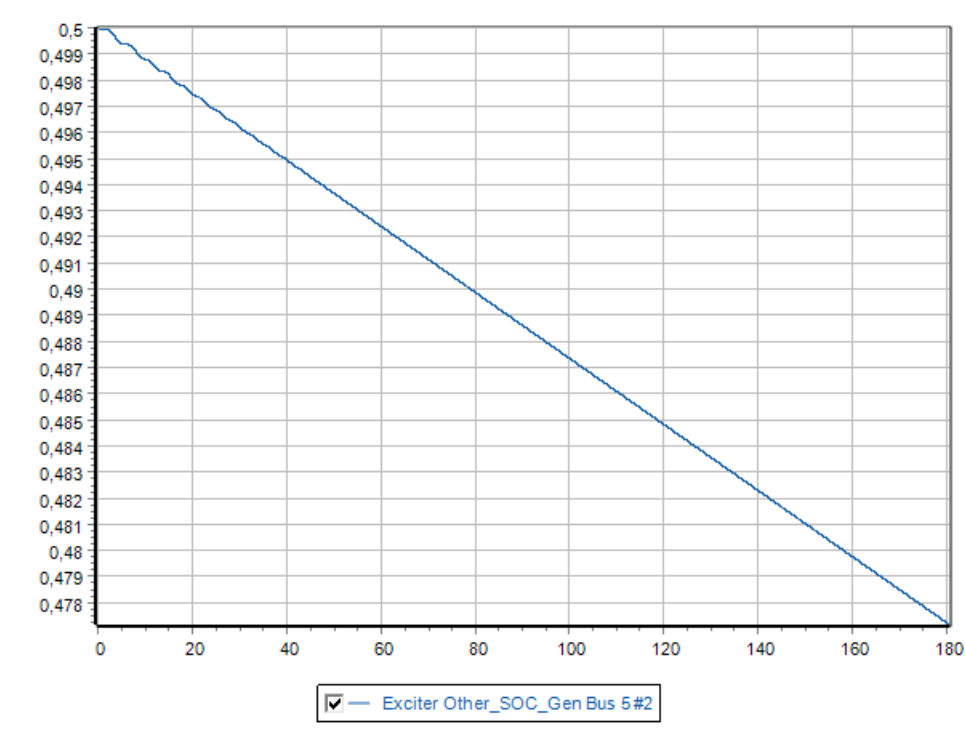
Εικόνα 6.115: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 200$



Εικόνα 6.116: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 300$



Εικόνα 6.117: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 400$



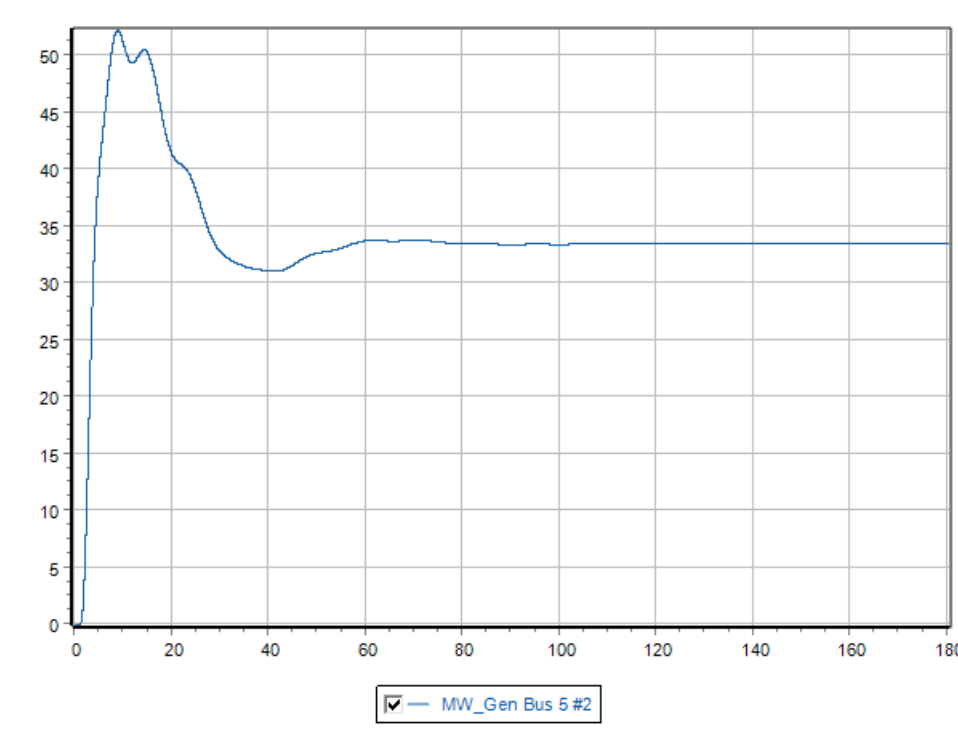
Εικόνα 6.118: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 500$

Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

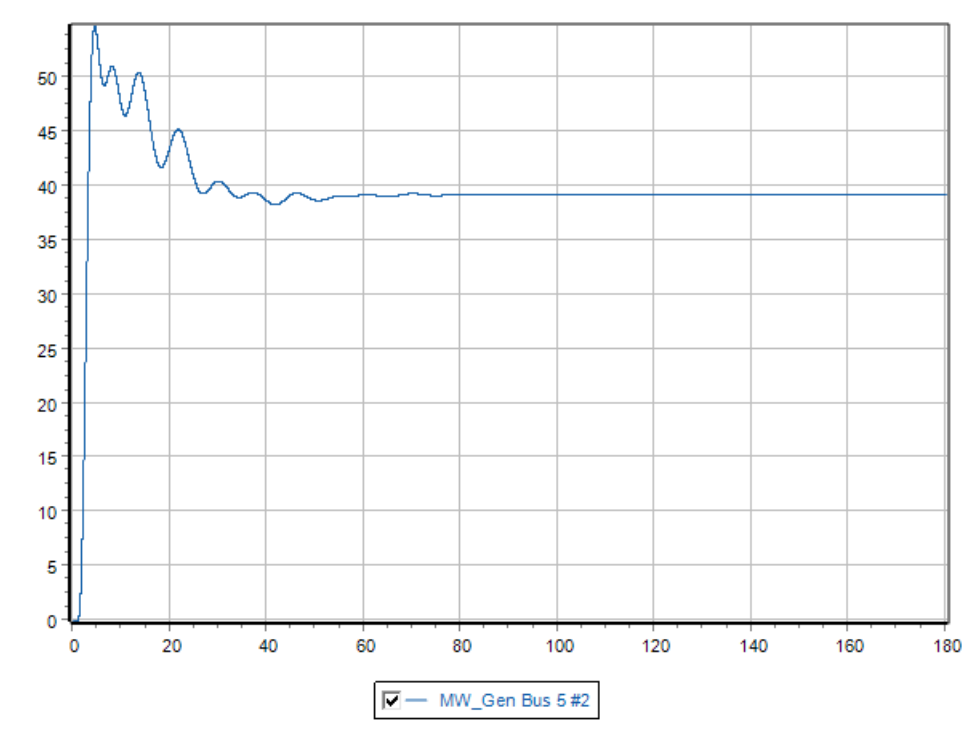
Η πραγματική ισχύς που παρέχεται και η άεργος ισχύς που καταναλώνεται είναι μεγαλύτερη, με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου Dup. Ο Πίνακας 6.15 συνοψίζει τις τελικές τιμές πραγματικής και άεργου ισχύος. Οι Εικόνες 6.119, 6.120, 6.121, 6.122, 6.123 και 6.124 απεικονίζουν την πραγματική ισχύ ενώ οι 6.125, 6.126, 6.127, 6.128, 6.129 και 6.130 την άεργο ισχύ για τιμές του συντελεστή Dup 50, 100, 200, 300, 400 και 500, αντίστοιχα.

*Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα πραγματικής και άεργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 3.1*

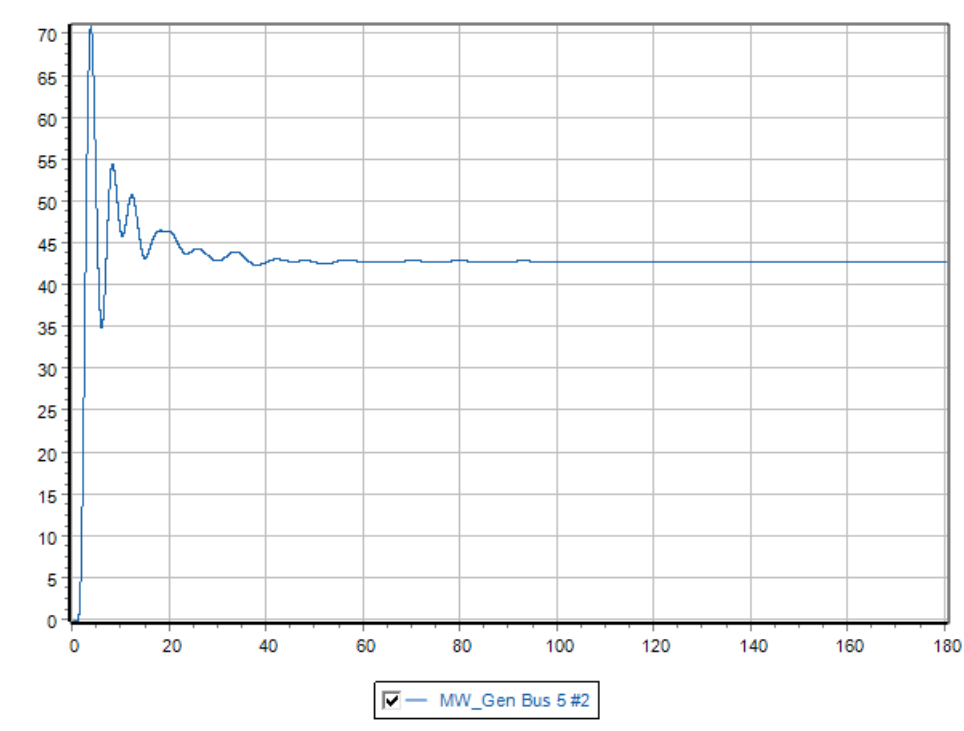
Συντελεστής Dup (pu)	50	100	200	300	400	500
Πραγματική Ισχύς (MW)	34	39	43	44	45	45
Άεργος Ισχύς (MVAR)	-22.5	-23	-23.9	-24	-24.1	-24.1



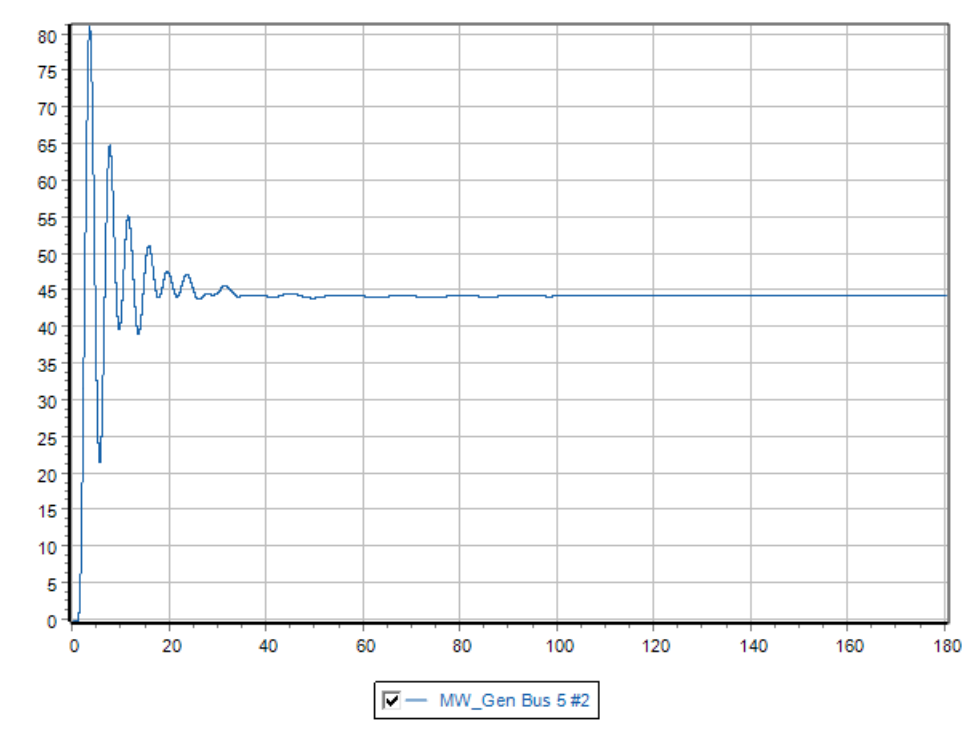
Εικόνα 6.119: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με dup = 50



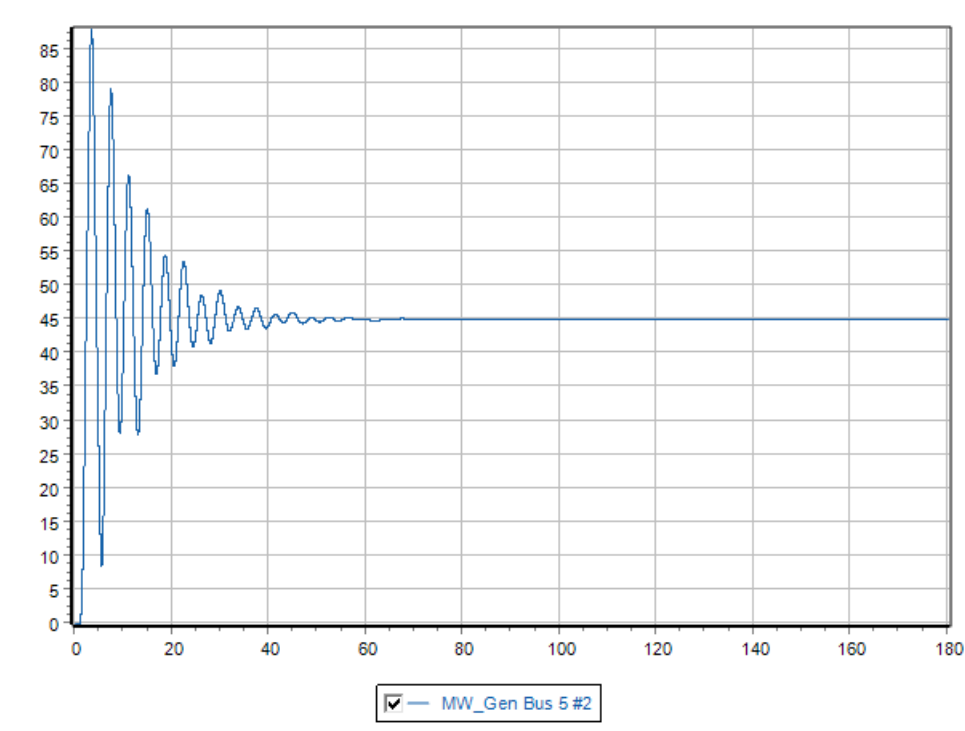
Εικόνα 6.120: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 100$



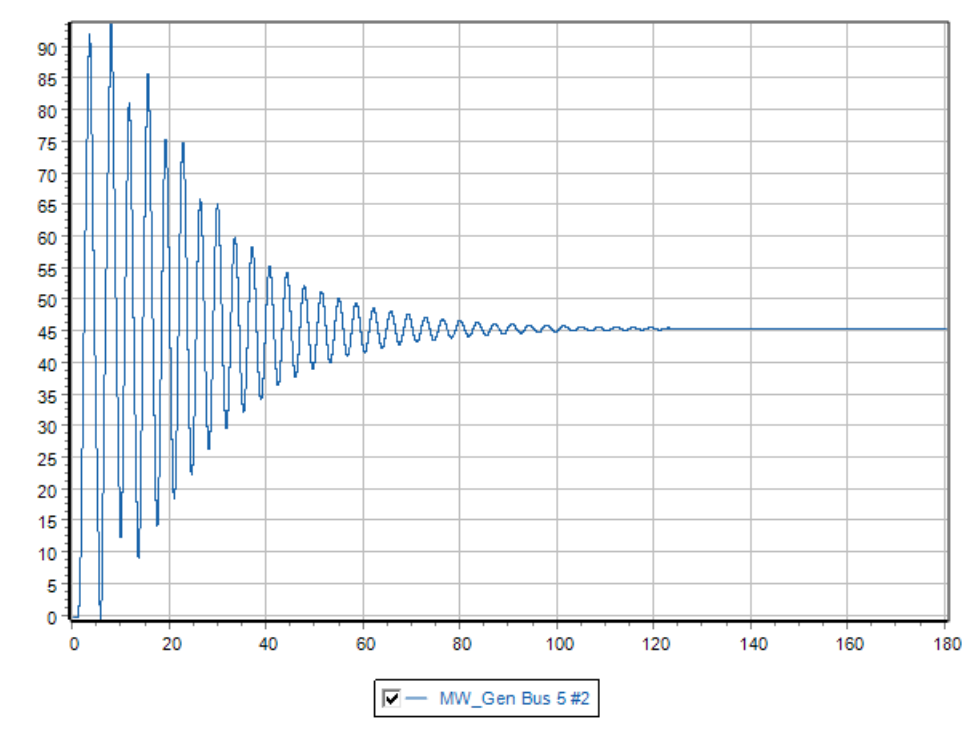
Εικόνα 6.121: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 200$



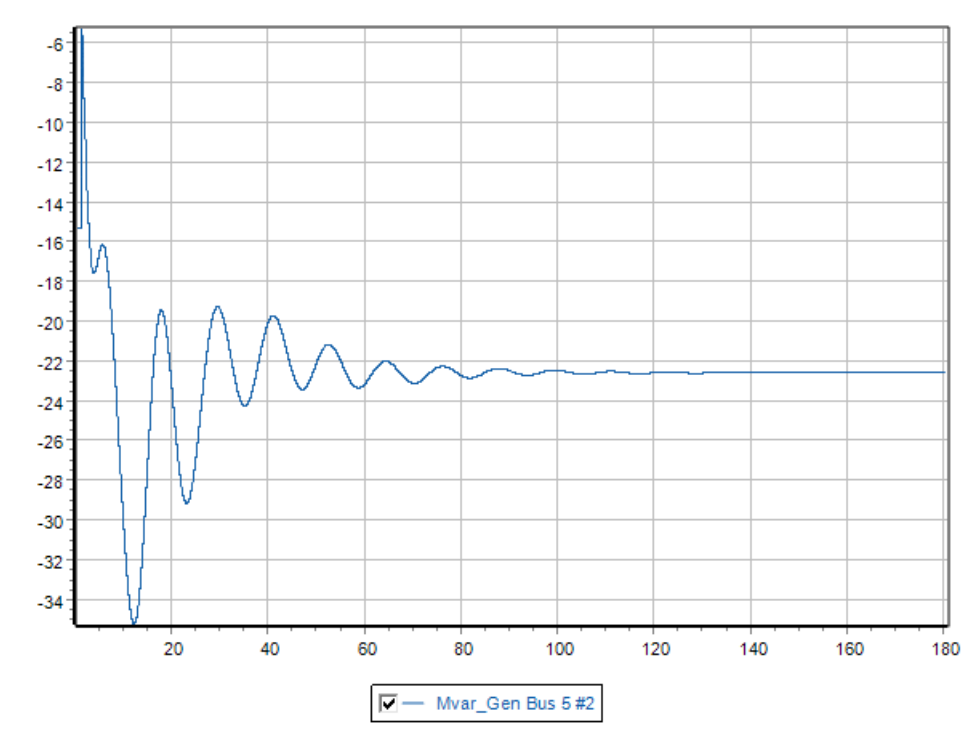
Εικόνα 6.122: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 300$



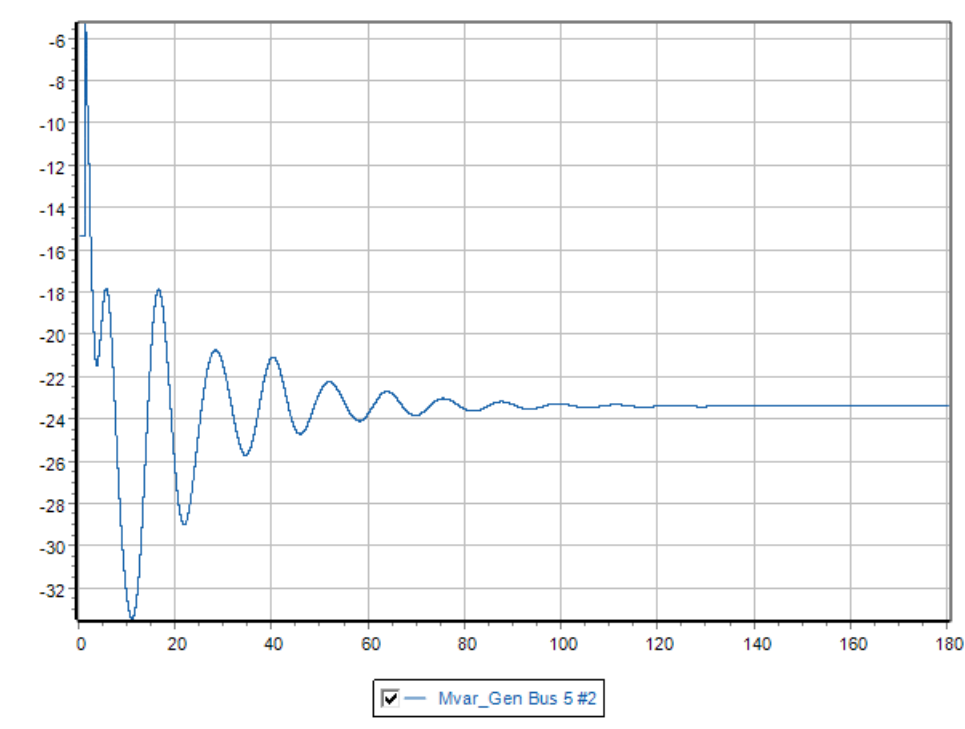
Εικόνα 6.123: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dur = 400$



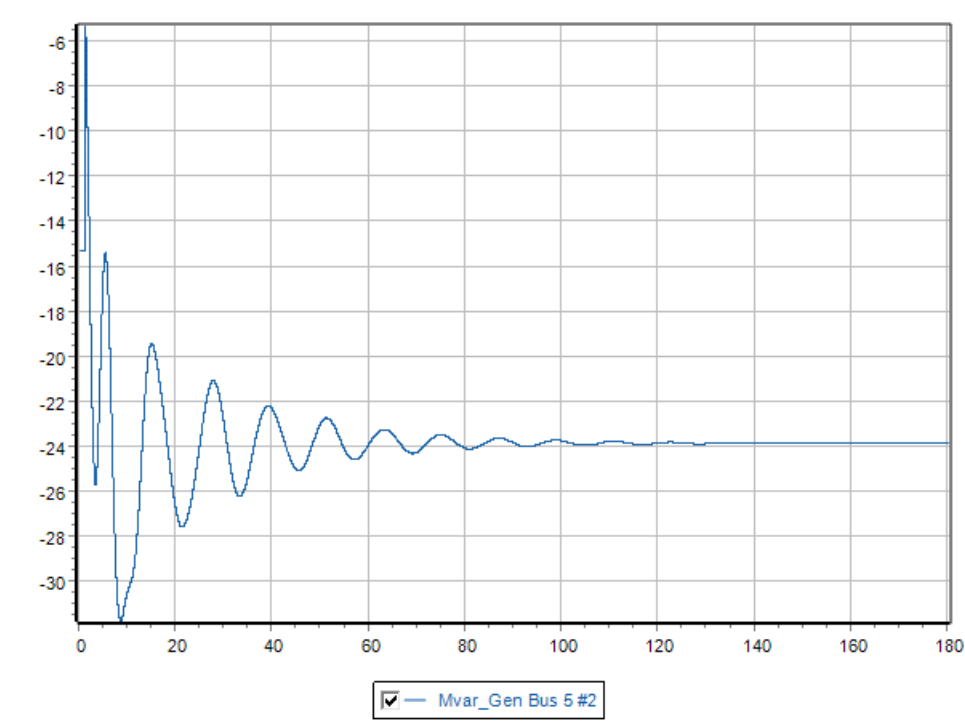
Εικόνα 6.124: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 500$



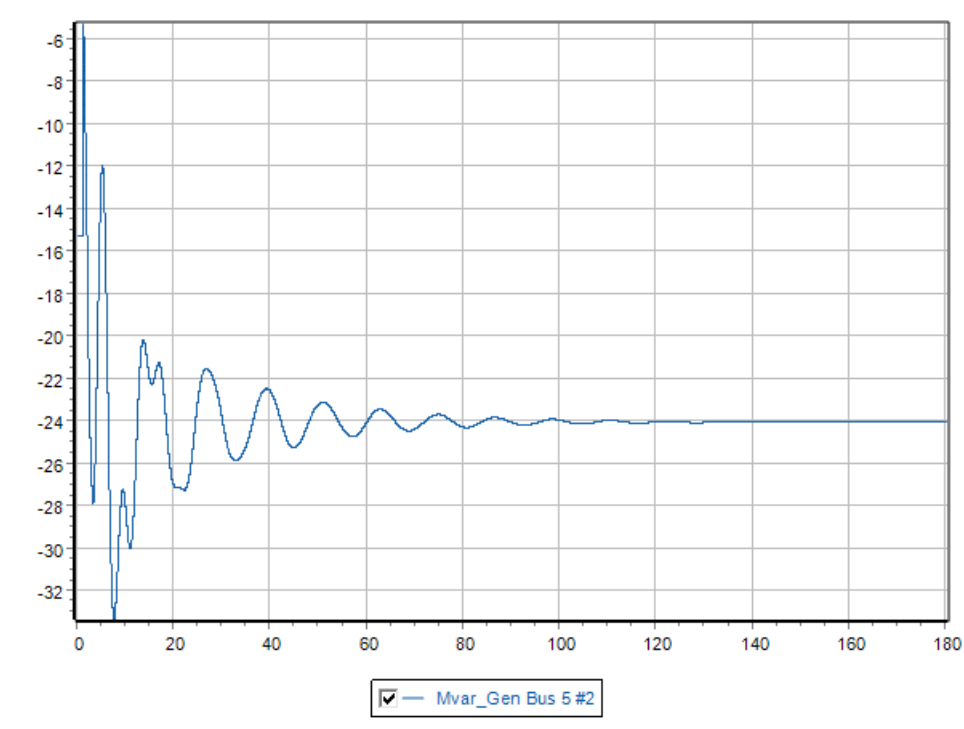
Εικόνα 6.125: Αεργός ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 50$



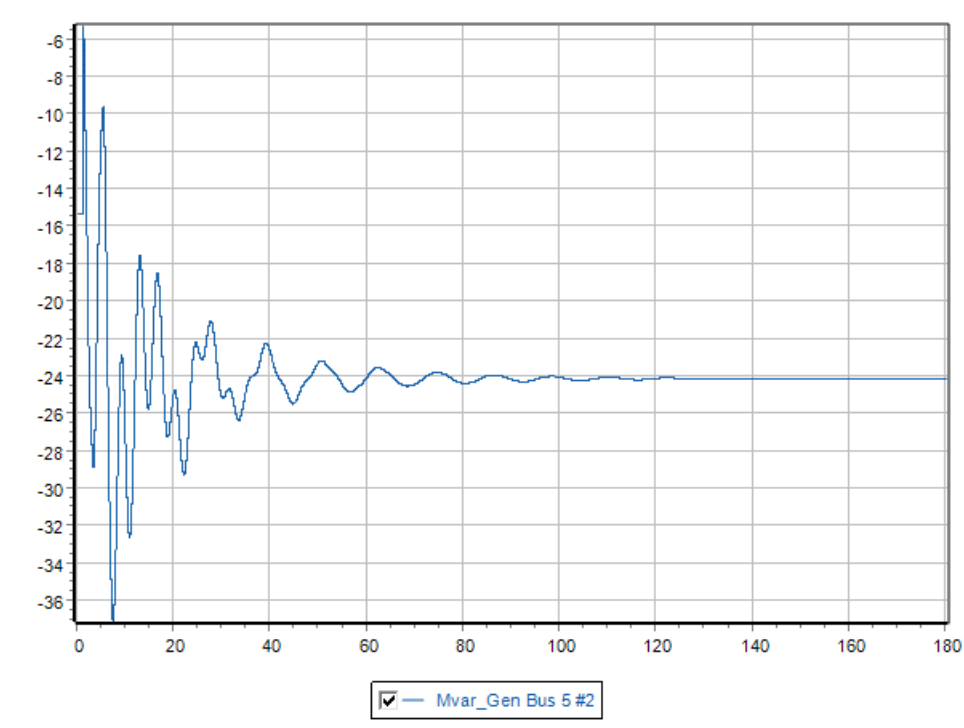
Εικόνα 6.126: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 100$



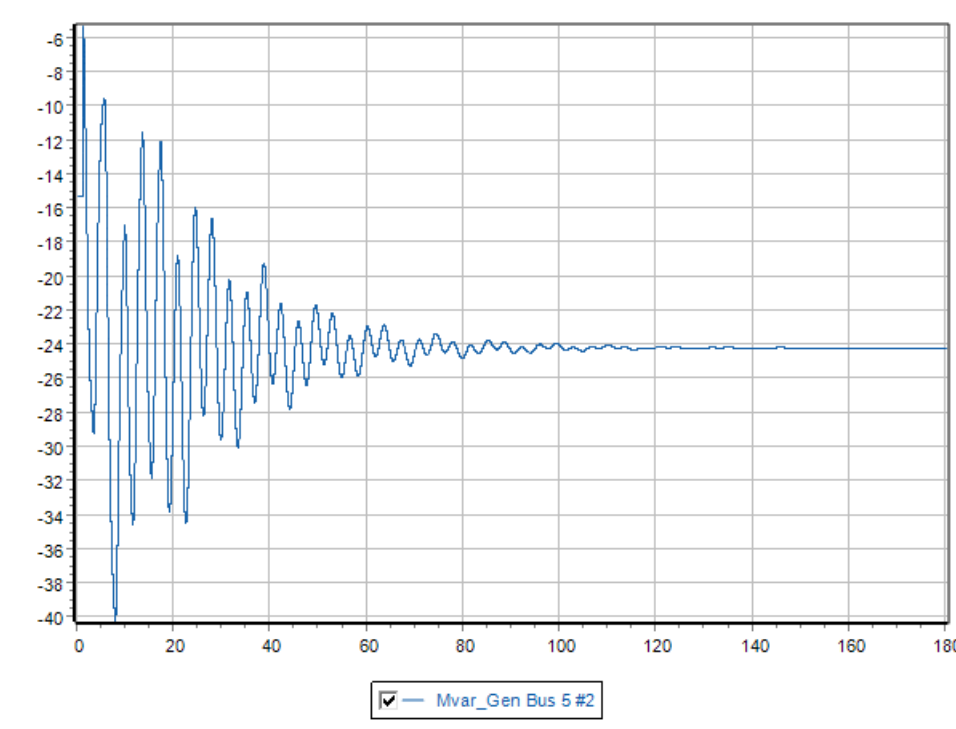
Εικόνα 6.127: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 200$



Εικόνα 6.128: Αεργός ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 300$



Εικόνα 6.129: Αεργός ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $dup = 400$



Εικόνα 6. 130: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία V2G με $d_{up} = 500$

Σενάριο 3.2: Αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% (175 MW)

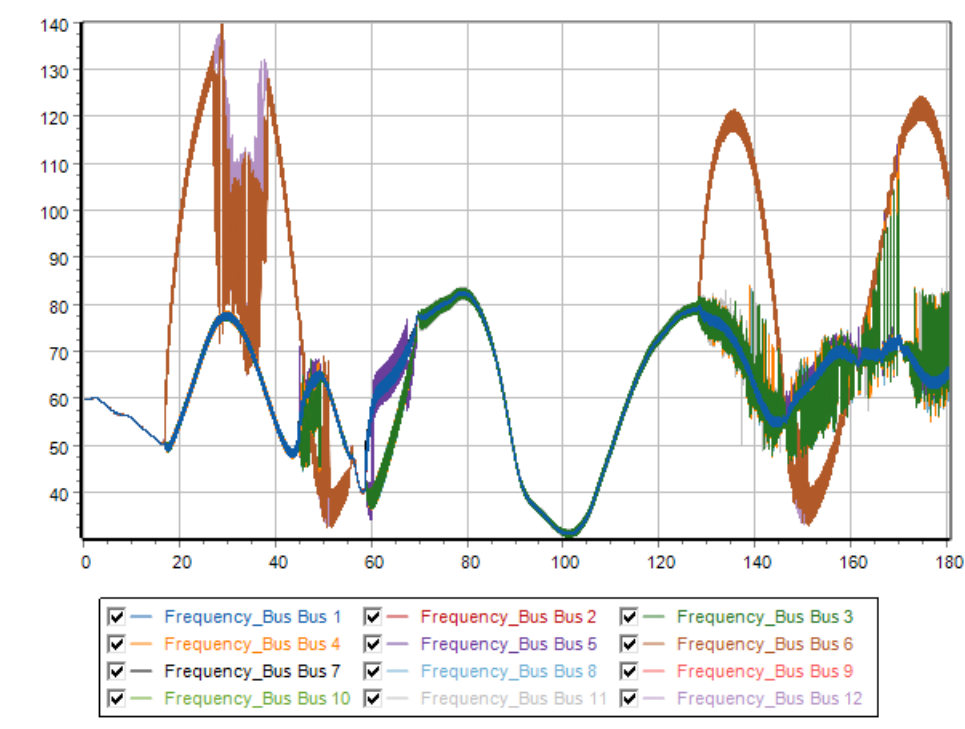
Α. Συχνότητα

Στο Σενάριο 3.2, εξετάζεται η αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 175 MW. Εν προκειμένω, μελετάται η συμπεριφορά του συστήματος σε μία διαταραχή μεγαλύτερη από αυτήν που είναι ικανά να καλύψουν τα ηλεκτρικά οχήματα που είναι συνδεδεμένα. Χωρίς την υποστήριξη της λειτουργίας V2G, η συχνότητα αρχίζει να αυξομειώνεται έντονα και με διαφορετικό τρόπο σε κάθε ζυγό, φτάνοντας σε αστάθεια, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.131.

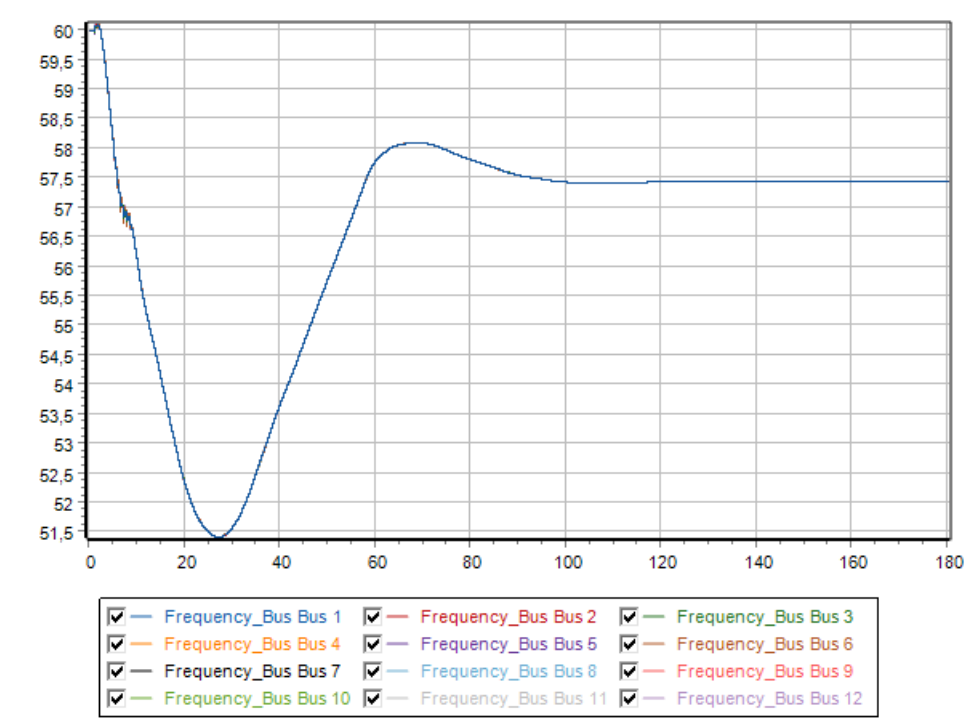
Η λειτουργία V2G, παρέχει ευέλικτη ισχύ λειτουργώντας ως εφεδρεία στο σύστημα. Παρόλο που η εφεδρεία του συστήματος δεν είναι αρκετή για να καλύψει πλήρως τη διαταραχή, φαίνεται ότι με την κατάλληλη επιλογή του συντελεστή D_{up} , μπορεί να φέρει τη συχνότητα σε σημείο ισορροπίας. Οι Εικόνες 6.132 και 6.133 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας για D_{up} 20 και 30, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.16 συνοψίζει τα αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας σε κάθε περίπτωση. Μία περαιτέρω αύξηση του συντελεστή D_{up} σε 100 έχει ως αποτέλεσμα τη διαρκή ταλάντωση της συχνότητας, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.134.

Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 3.2

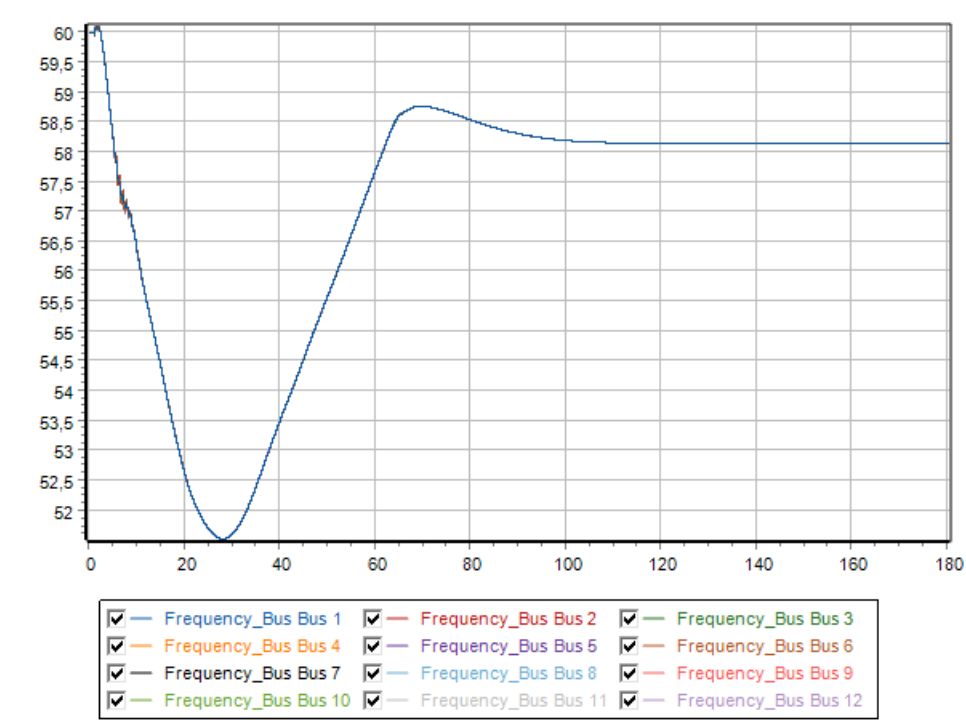
Συντελεστής Dup (pu)	10	20	30	100
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	4.6	2.6	1.9	Ταλάντωση



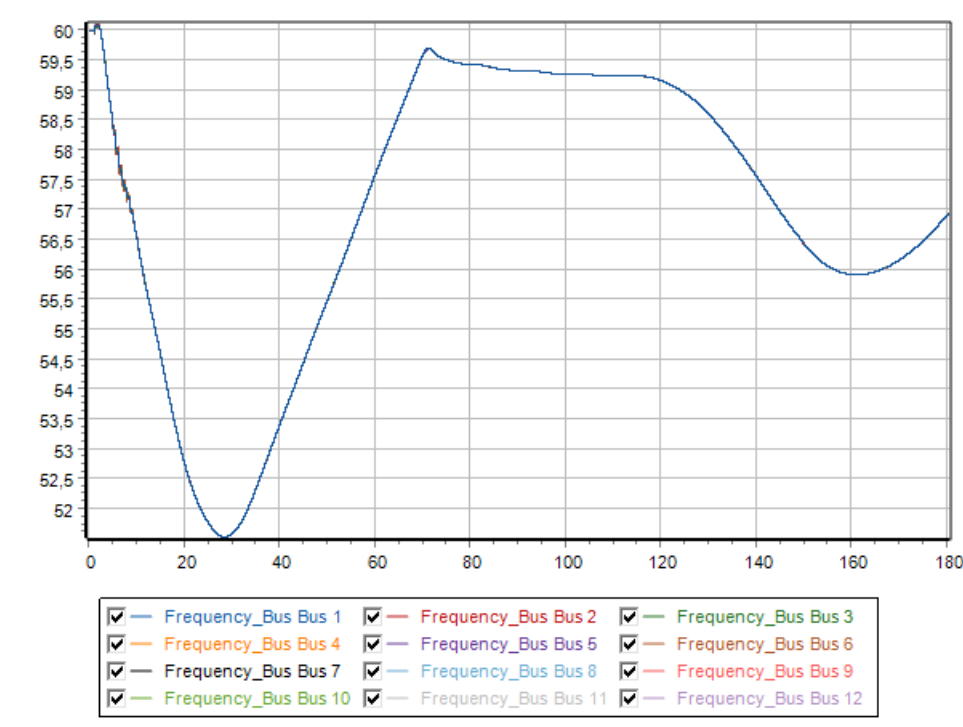
Εικόνα 6.131: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,απουσία V2G



Εικόνα 6.132: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 20$



Εικόνα 6.133: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 30$

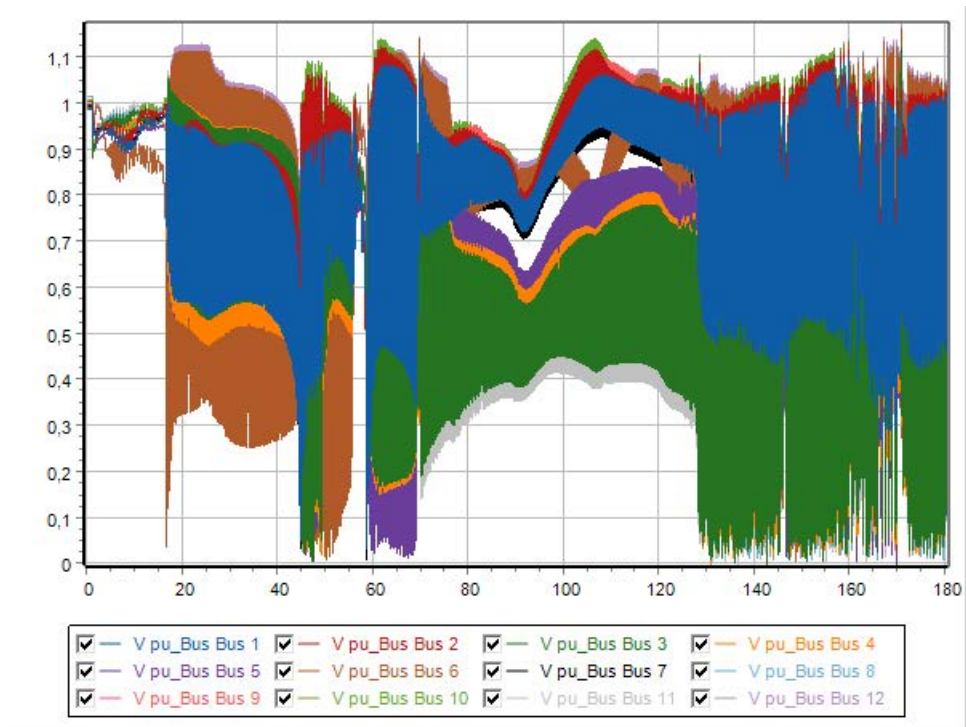


Εικόνα 6.134: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 100$

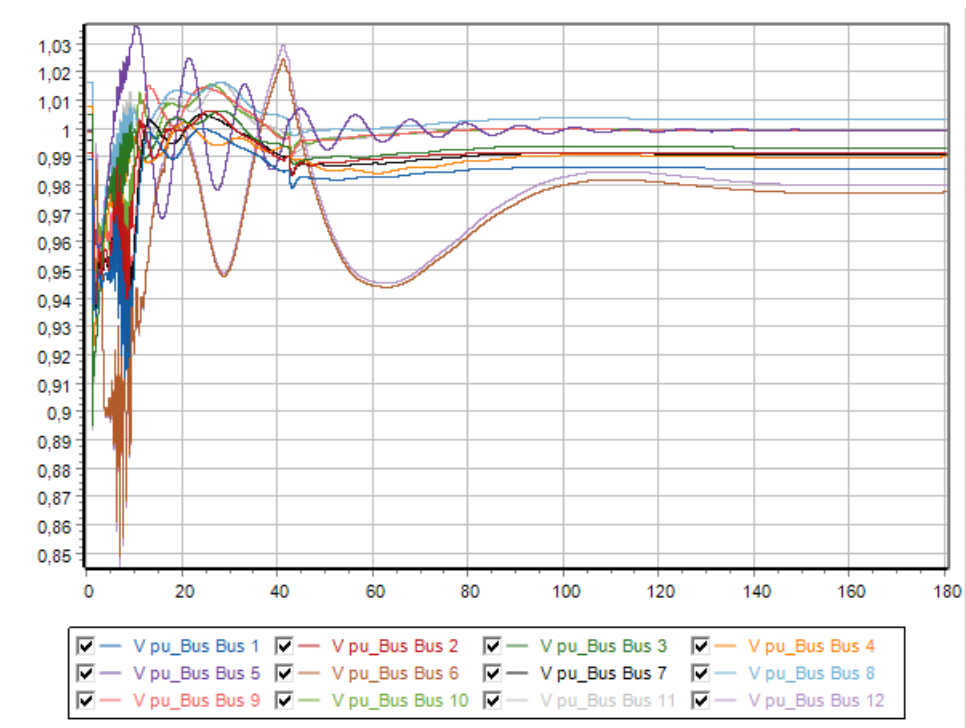
B. Τάση

Η εισαγωγή μίας μεγάλης διαταραχής, όπως η αύξηση της ζήτησης κατά 175 MW φτάνει το σύστημα σε κατάσταση αστάθειας. Όταν η ζήτηση αυξάνεται και το σύστημα δεν μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ, η τάση στους ζυγούς αρχίζει να πέφτει και τελικά φτάνει σε κατάρρευση, όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 6.135.

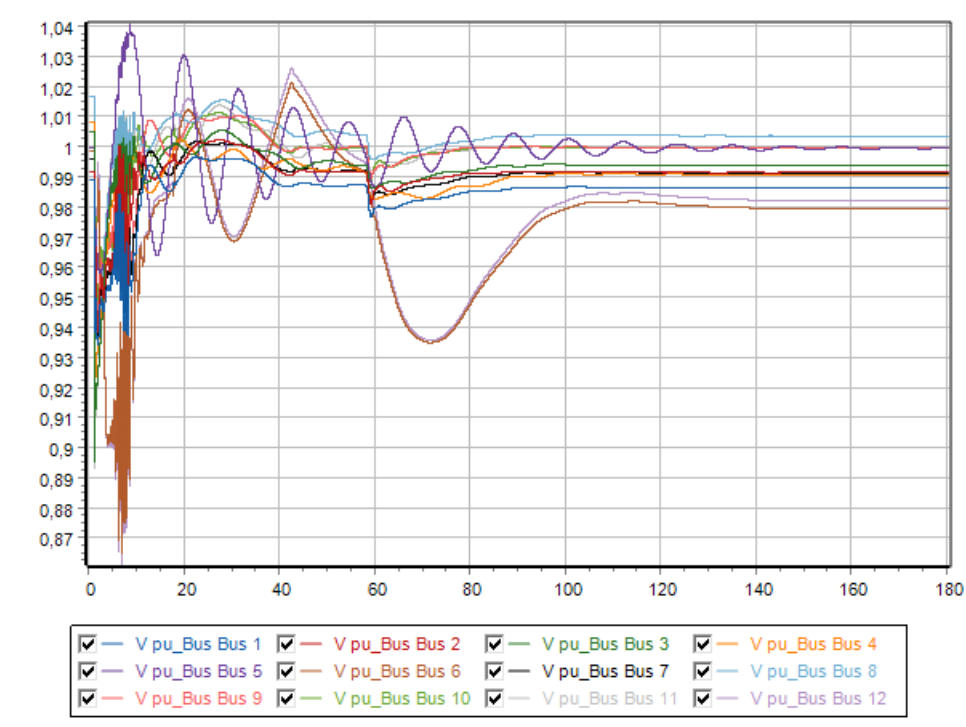
Τα ηλεκτρικά οχήματα, λειτουργούν ως εφεδρικοί πόροι και επαναφέρουν την τάση των ζυγών του συστήματος στην τιμή που είχαν στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι Εικόνες 6.136, 6.137, 6.138 και 6.139 απεικονίζουν την μεταβολή της τάσης για συντελεστή Dur 10, 20, 30 και 100, αντίστοιχα.



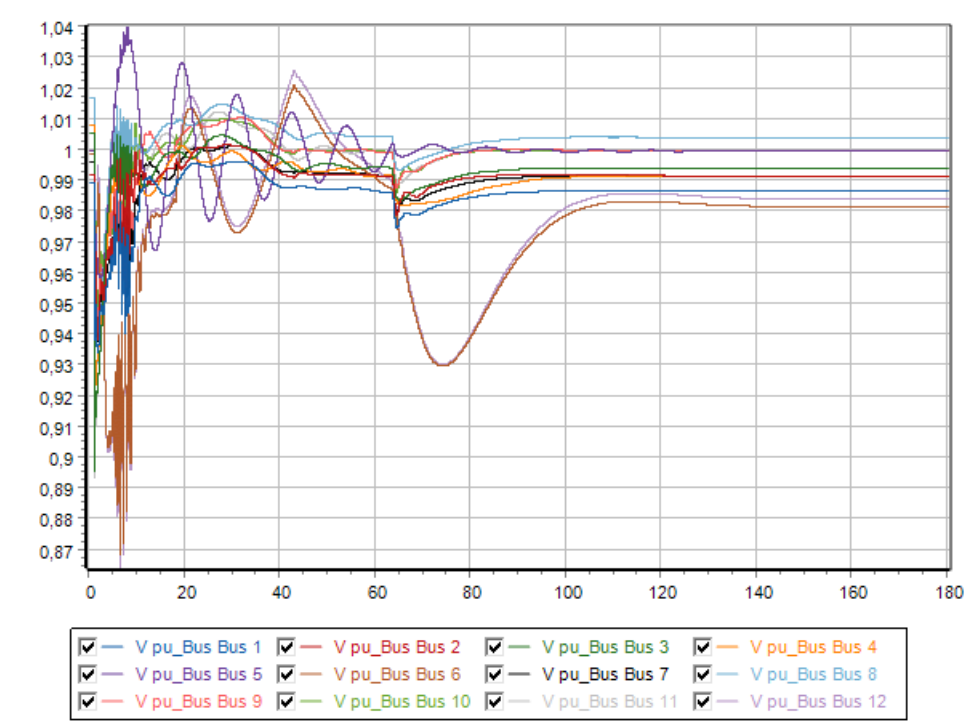
Εικόνα 6.135: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,απουσία V2G



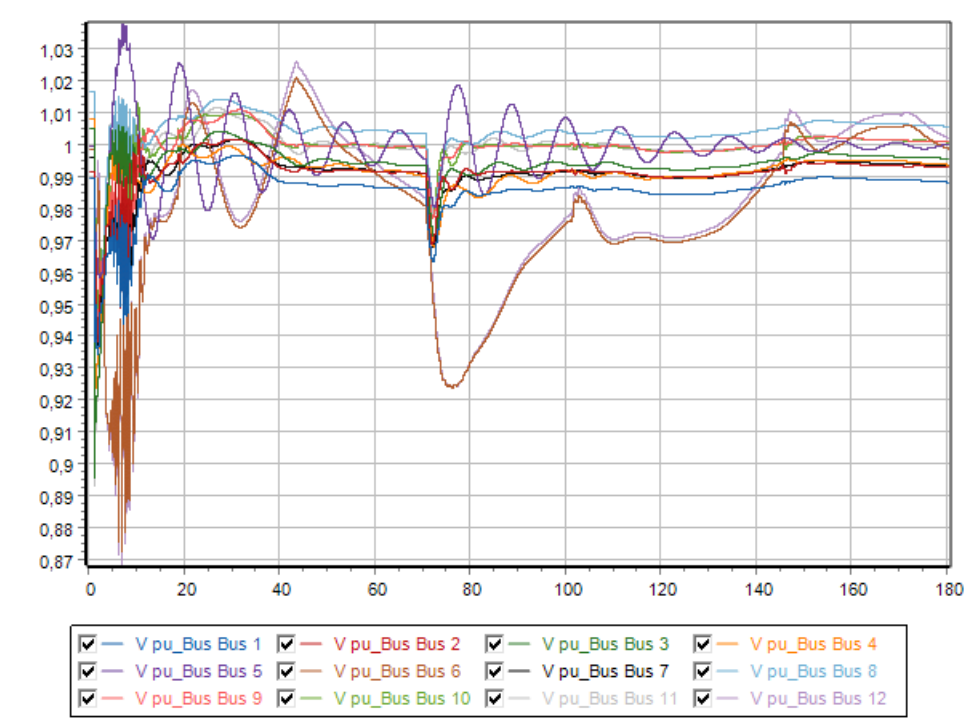
Εικόνα 6.136: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dup = 10$



Εικόνα 6.137: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dup = 20$



Εικόνα 6.138: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dup = 30$



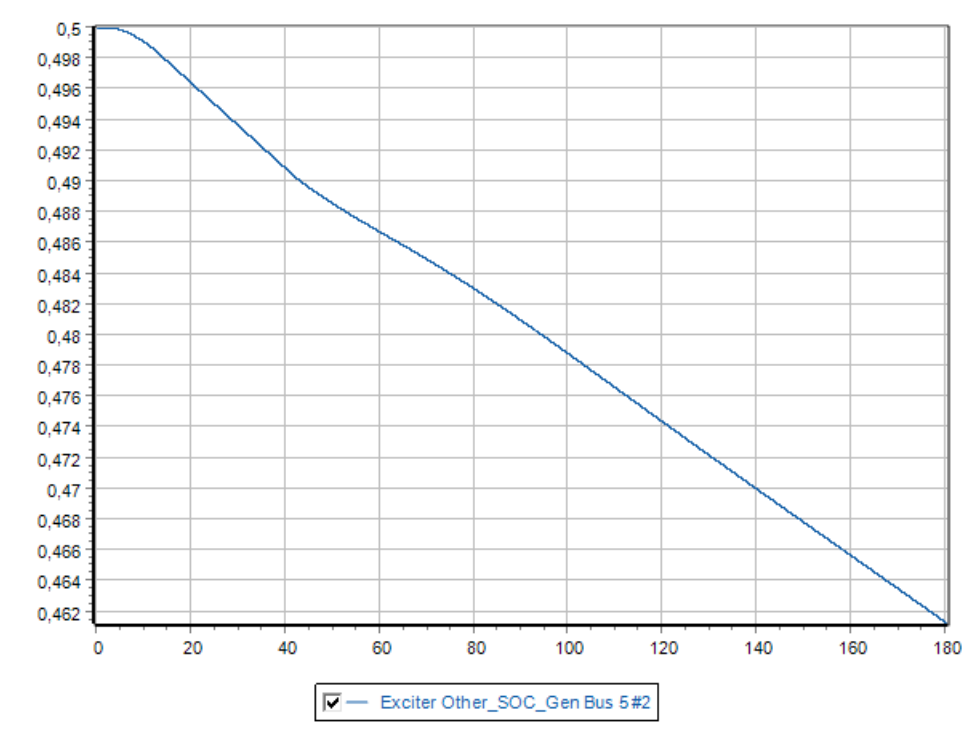
Εικόνα 6.139: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 100$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

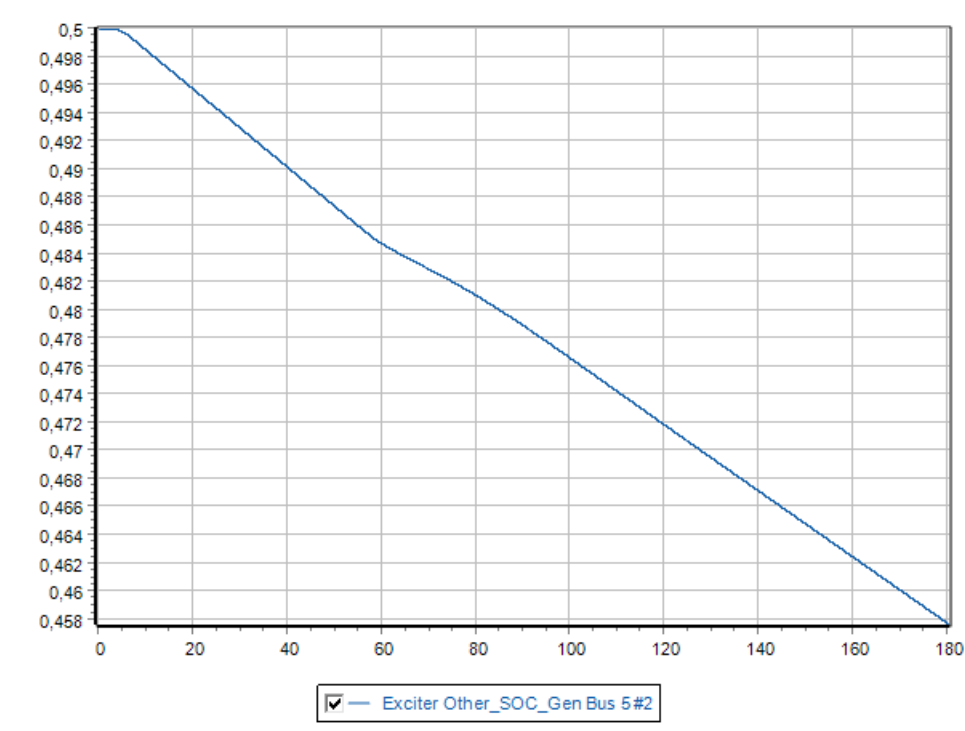
Η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης (SOC) παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση με την αύξηση του συντελεστή Dur , όπως και στα σενάρια που προηγήθηκαν. Ο Πίνακας 6.17 συνοψίζει τις μεταβολές της κατάστασης φόρτισης που φαίνονται από τις Εικόνες 6.140, 6.141, 6.142 και 6.143 για τις διάφορες τιμές του συντελεστή Dur .

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 3.2

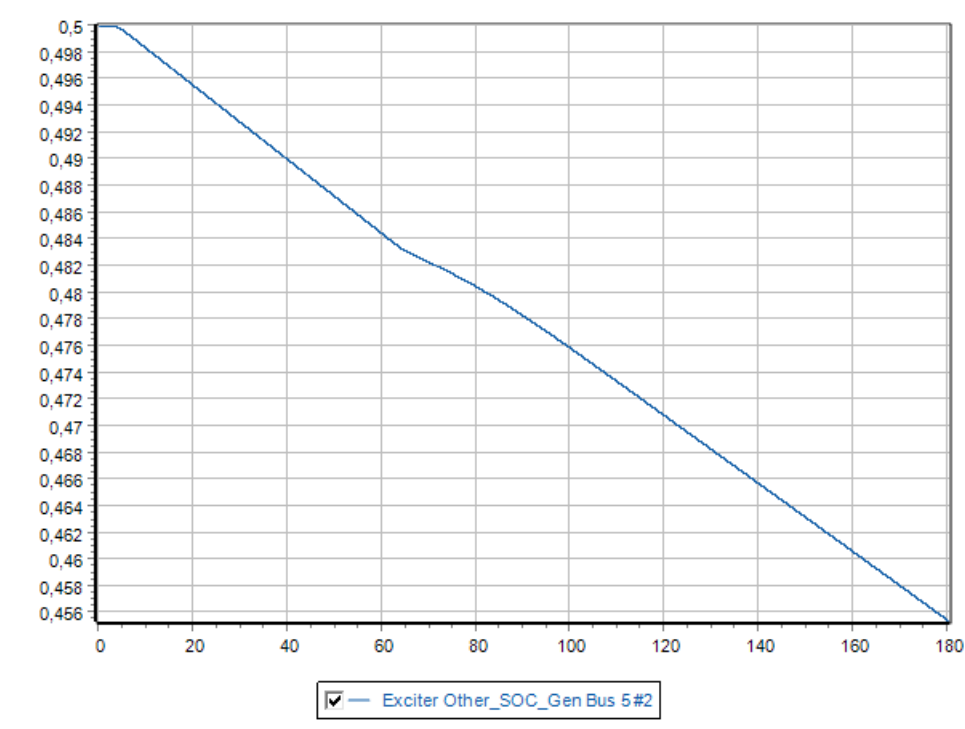
Συντελεστής Dur (pu)	10	20	30	100
Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ΔSOC (%)	-3.8	-4.2	-4.4	-4.7



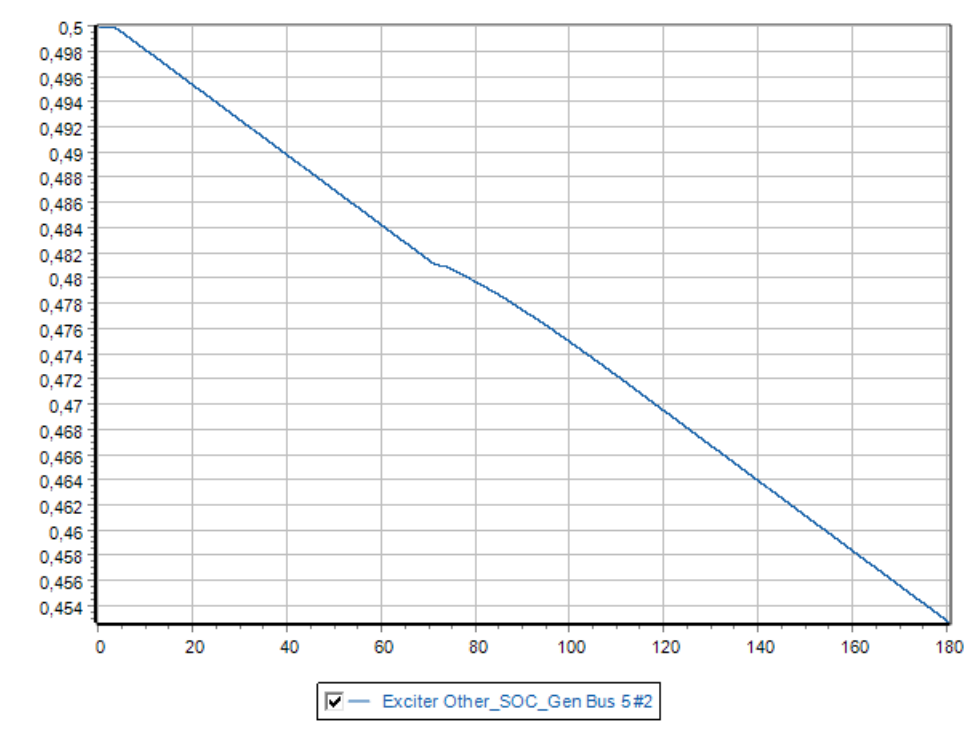
Εικόνα 6.140: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 10$



Εικόνα 6.141: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 20$



Εικόνα 6.142: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 30$



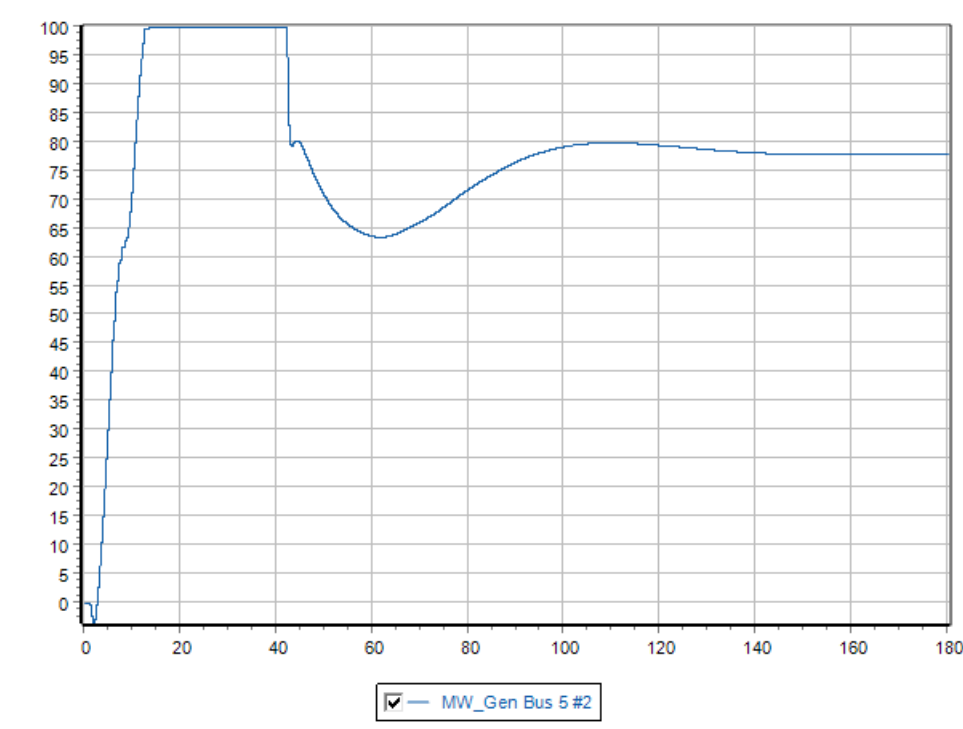
Εικόνα 6.143: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% ,παρουσία V2G με $dur = 100$

Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

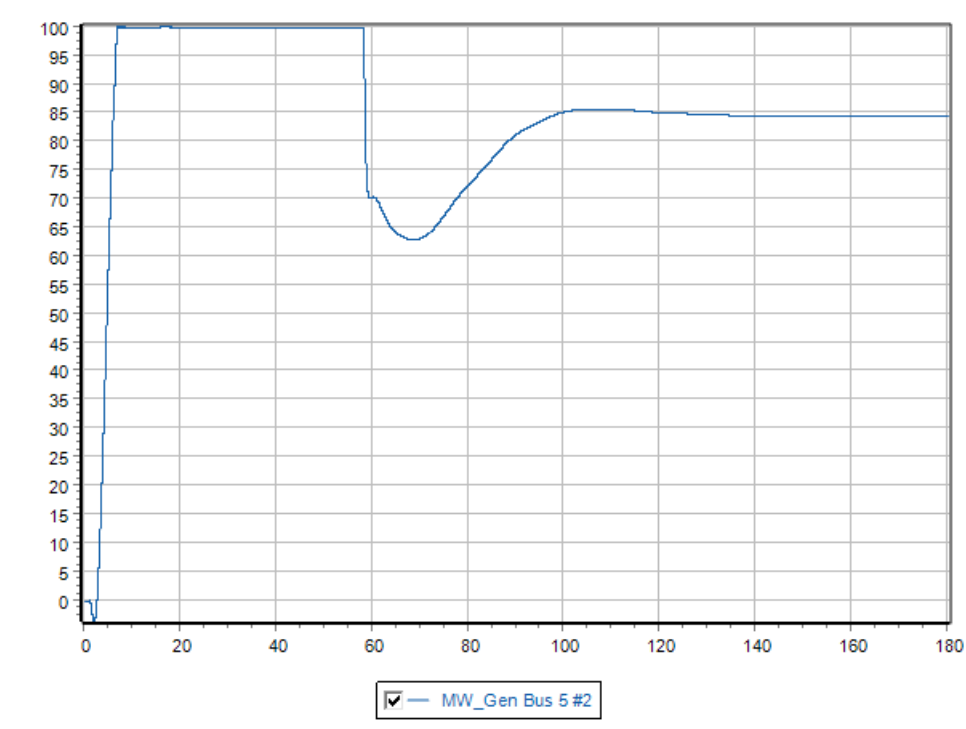
Η ενεργός ισχύς που παρέχεται από τα οχήματα V2G είναι πάντα μικρότερη της τιμής $P_{max} = 100 \text{ MW}$, και αυξάνεται με την περαιτέρω αύξηση της τιμής της παραμέτρου Dup . Η ενεργός ισχύς απεικονίζεται στις Εικόνες 6.144, 6.145, 6.146 και 6.147. Αντίστοιχα, η άεργη ισχύς που καταναλώνεται λαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερες τιμές κατά απόλυτη τιμή, με την αύξηση της Dup και απεικονίζεται στις Εικόνες 6.148, 6.149, 6.150 και 6.151. Ο Πίνακας 6.18 συνοψίζει τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 3.2

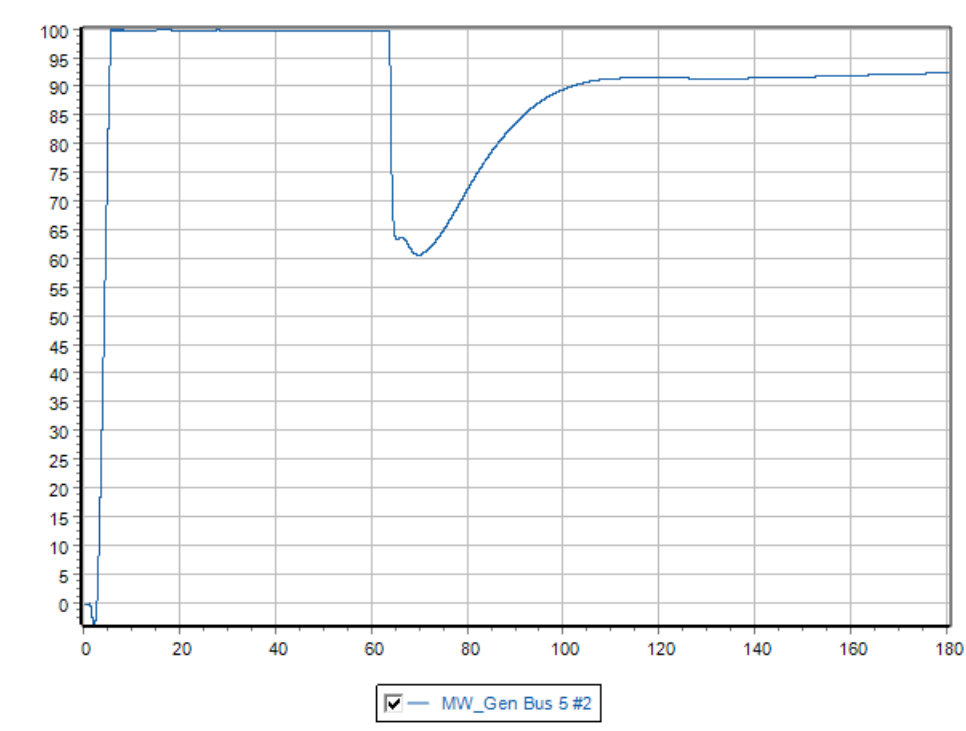
Συντελεστής Dup (pu)	10	20	30	100
Πραγματική Ισχύς (MW)	78	80	92	Ταλάντωση
Άεργος Ισχύς (MVAR)	-3	-4	-5	Ταλάντωση



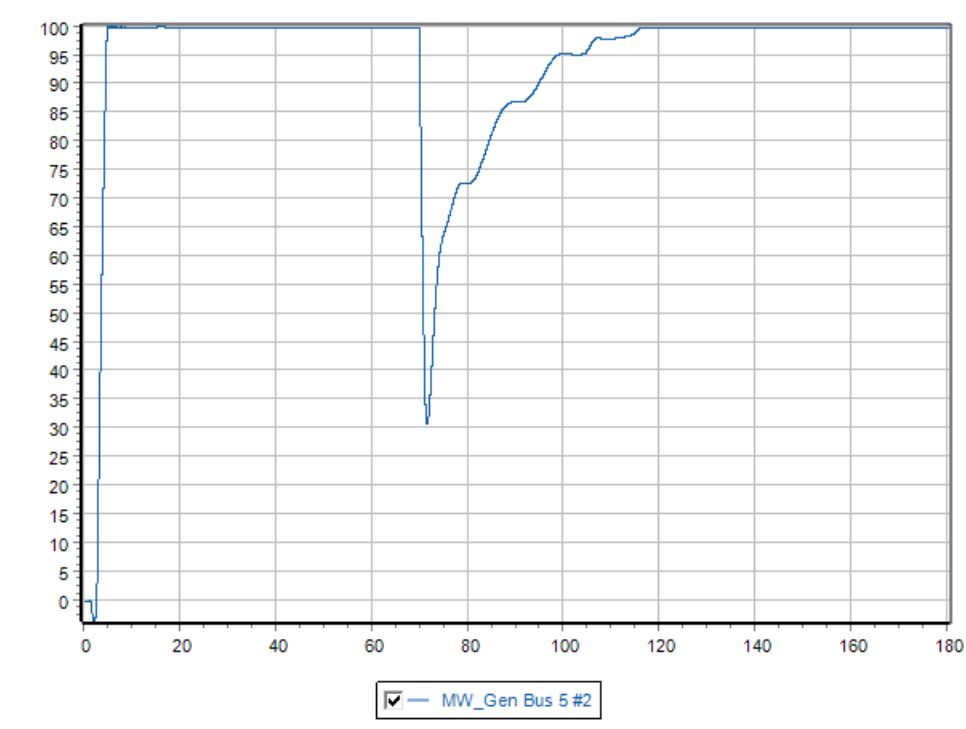
Εικόνα 6. 144: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50%, παρουσία V2G με $dup = 10$



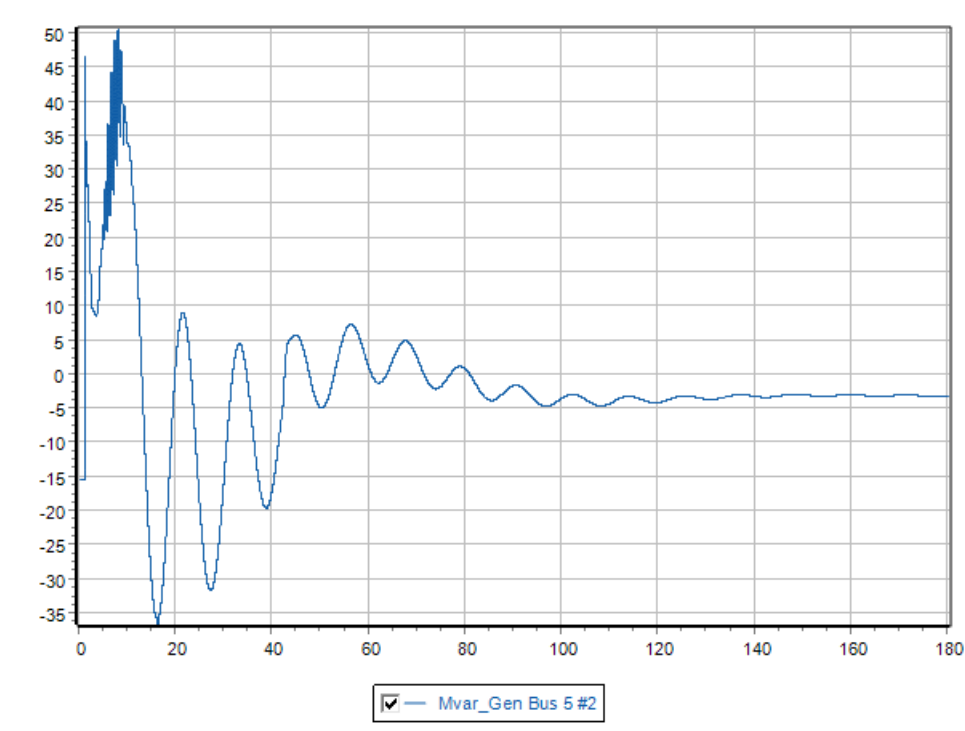
Εικόνα 6.145: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dur = 20$



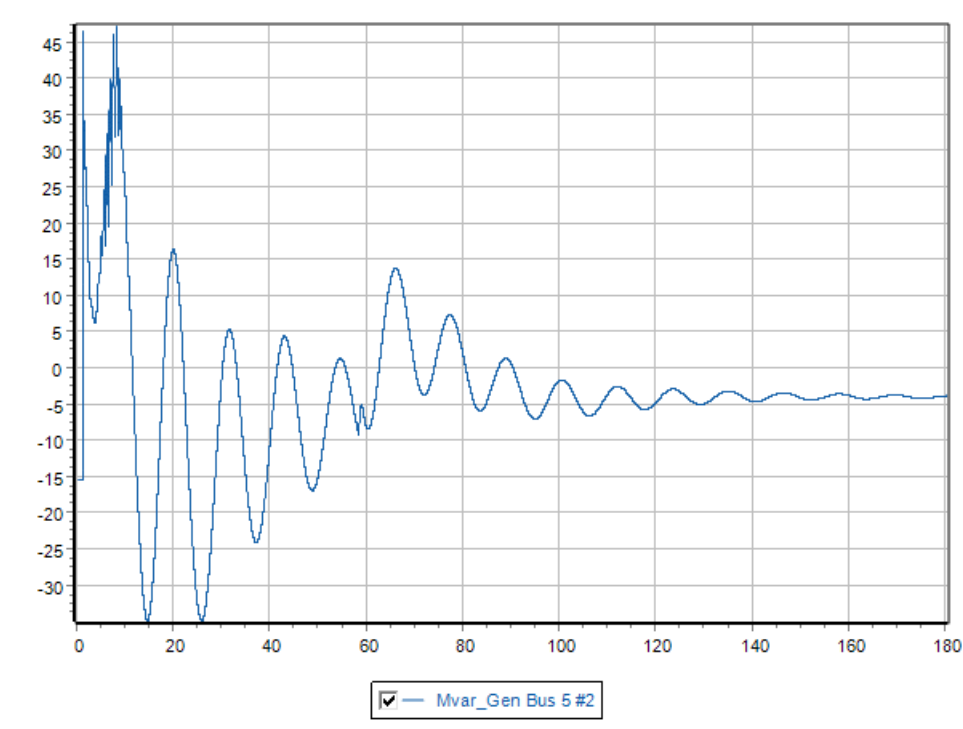
Εικόνα 6.146: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dur = 30$



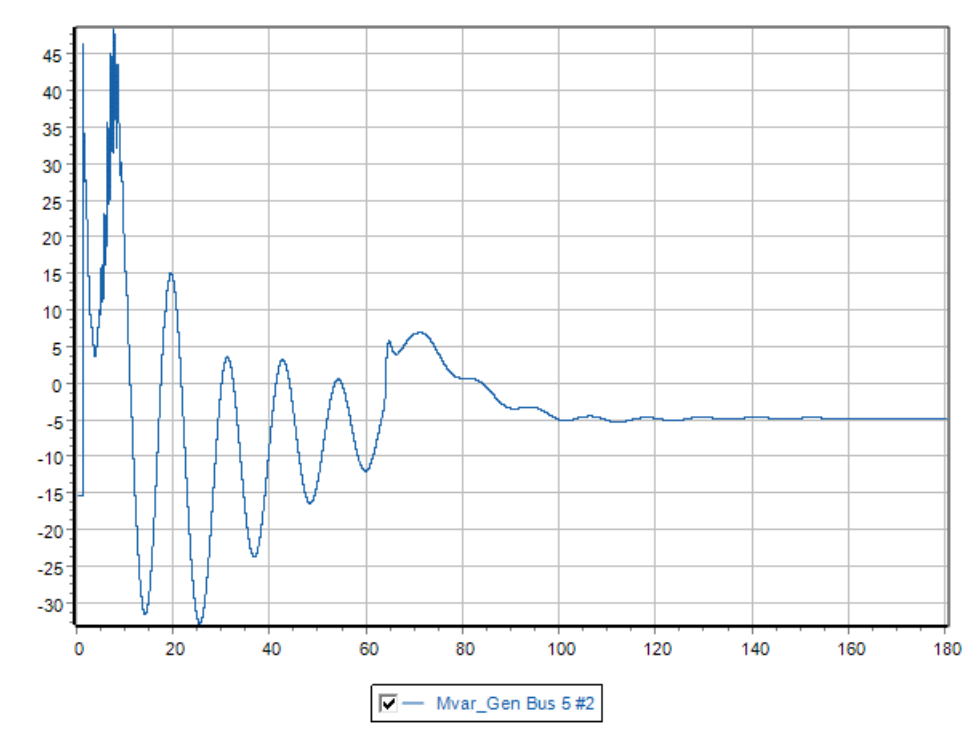
Εικόνα 6.147: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dur = 100$



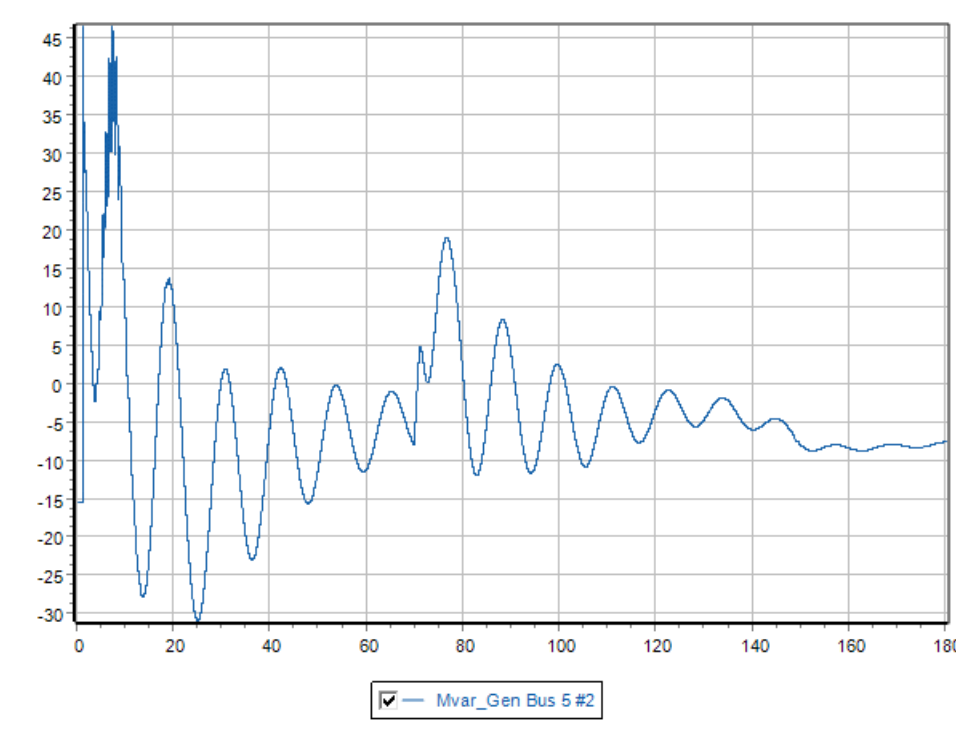
Εικόνα 6.148: Αεργός ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dur = 10$



Εικόνα 6.149: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dup = 20$



Εικόνα 6.150: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dup = 30$



Εικόνα 6.151: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 3 κατά 50% , παρουσία V2G με $dur = 100$

Σενάριο 4: Μείωση της ζήτησης στα φορτία των ζυγών (G2V)

Στο Σενάριο 4, εξετάζονται περιπτώσεις στις οποίες υπάρχουν μεταβολές που προκαλούν την αύξηση της συχνότητας. Αυτή η αύξηση της συχνότητας αποτελεί ένδειξη πλεονάζουσας ενέργειας στο σύστημα, καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει τη ζήτηση. Μελετάται, εάν μέσω της έξυπνης φόρτισης μπορεί να αυξηθεί η ζήτηση και να απορροφήσει την υπερβάλλουσα ενέργεια, κάτι που συμβάλλει στη μείωση της συχνότητας και στην ευστάθεια του δικτύου.

Σενάριο 4.1: Μείωση της ζήτησης στο φορτίο του ζυγού 4 κατά 10% (30 MW)

Α. Συχνότητα

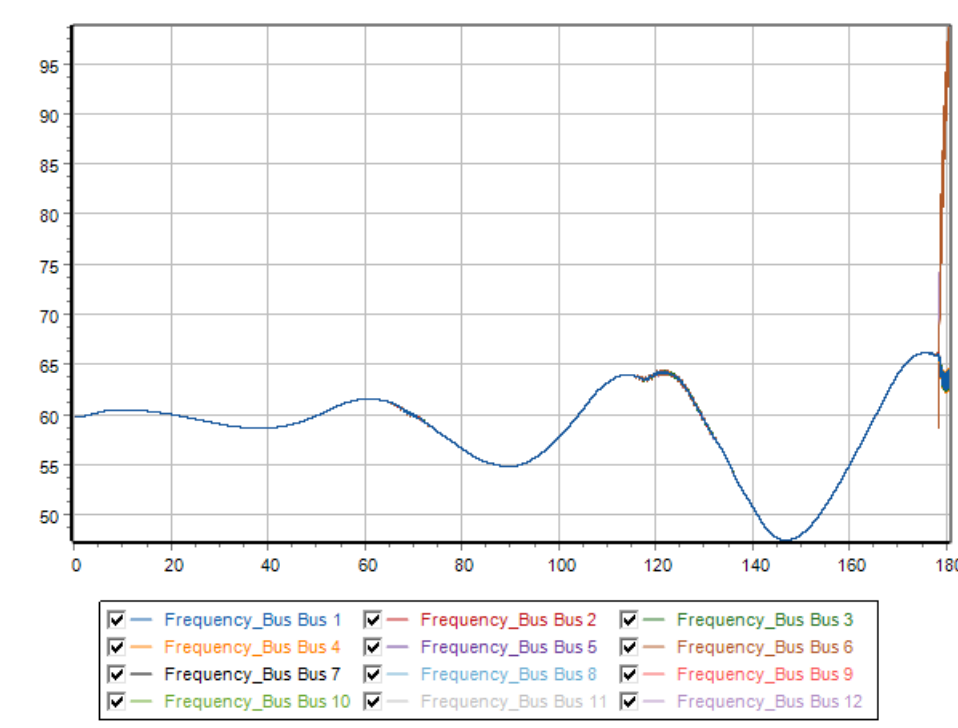
Η μείωση της ζήτησης στο φορτίο του ζυγού 4 κατά 30 MW φαίνεται να προκαλεί σημαντικές μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου. Οι ρυθμιστές στροφών δεν ανταποκρίνονται επαρκώς και έγκαιρα στη μείωση του φορτίου, προκαλώντας μεγάλες διακυμάνσεις στη συχνότητα, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.152.

Αντίθετα, όταν το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων συνδέεται στο σύστημα για φόρτιση (G2V), παρατηρείται πιο σταθερή απόκριση στη συχνότητα. Τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν ως δυναμικοί καταναλωτές, απορροφώντας την υπερβάλλουσα ισχύ

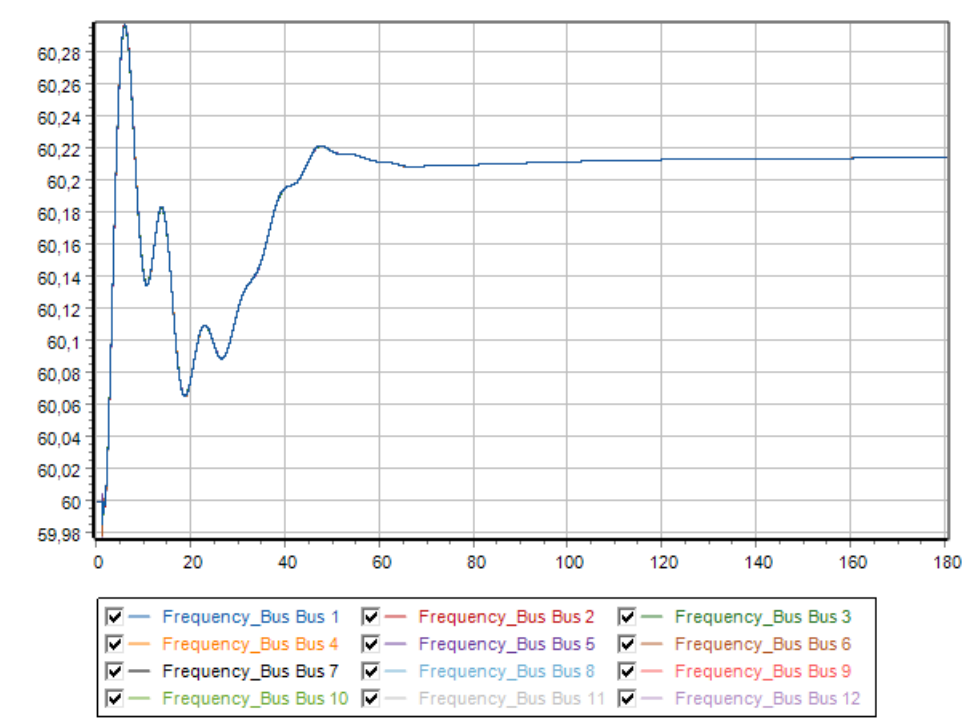
και συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση της συχνότητας. Παρόλο που διατηρείται ένα μόνιμο σφάλμα στη συχνότητα, η γενική συμπεριφορά του συστήματος είναι πιο αξιόπιστη και σταθερή σε σύγκριση με την κατάσταση όπου δεν υπάρχουν συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα. Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου Ddn, η οποία επηρεάζει την απόκριση των οχημάτων στη μεταβολή της συχνότητας, οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του μόνιμου σφάλματος συχνότητας, οι τιμές του οποίου καταγράφονται στον Πίνακα 6.19. Η παράμετρος Ddn ρυθμίζει το βαθμό με τον οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα αντιδρούν στις μεταβολές της συχνότητας, και η σωστή της ρύθμιση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη σταθερότητα του συστήματος. Οι Εικόνες 6.153, 6.154 και 6.155 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας για τιμές Ddn 50, 100 και 200, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.19: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 4.1

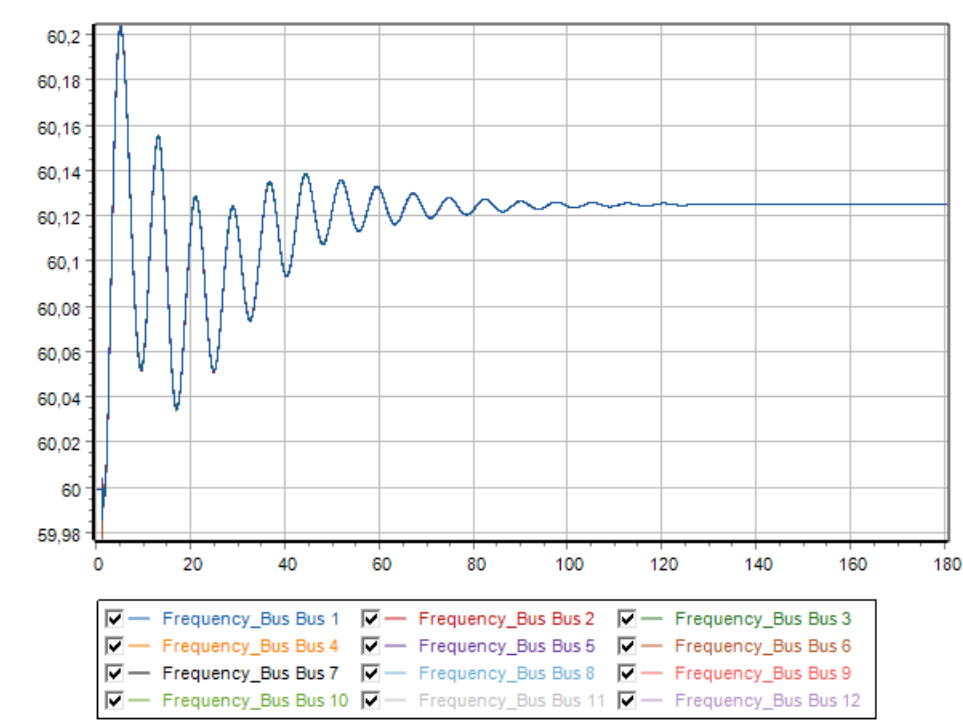
Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	-0.21	-0.125	-0.069



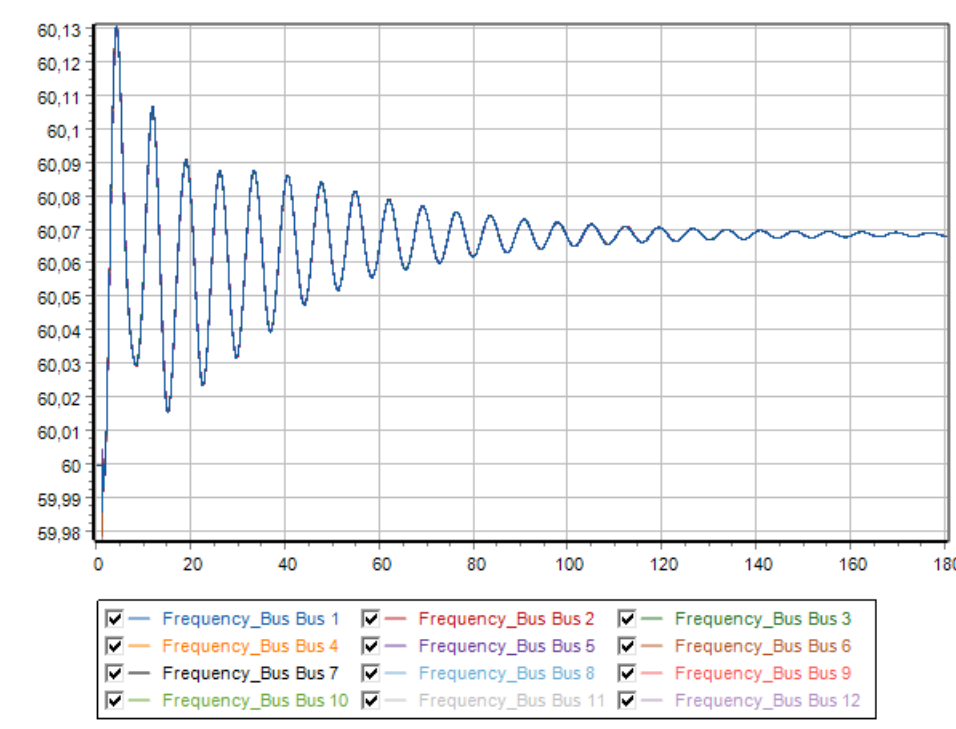
Εικόνα 6. 152: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% ,απουσία G2V



Εικόνα 6.153: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddh = 50$



Εικόνα 6.154: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddh = 100$

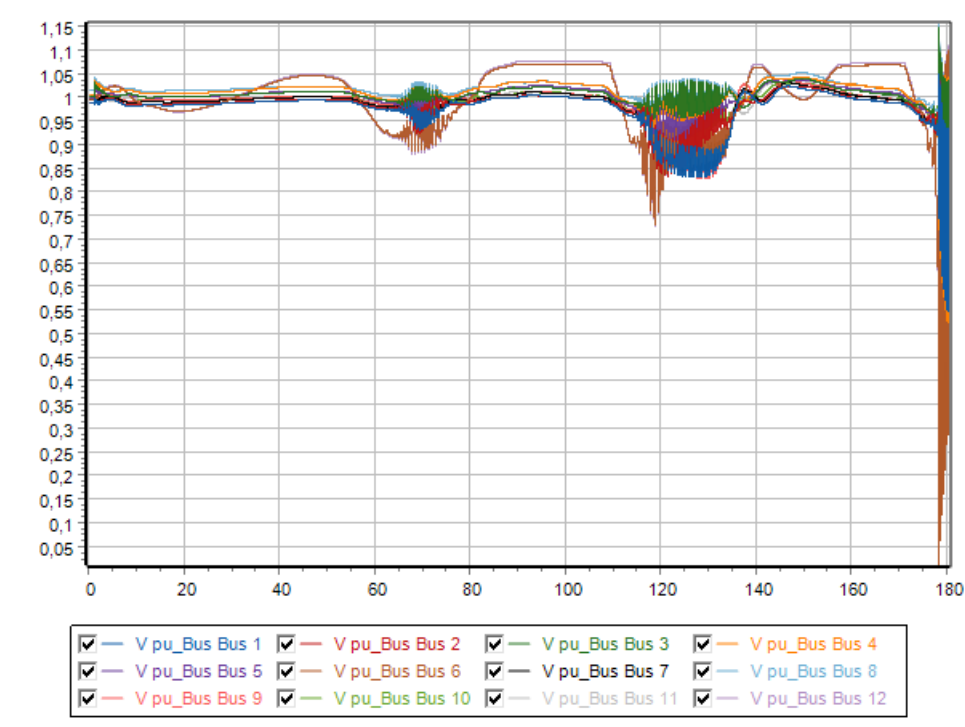


Εικόνα 6.155: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$

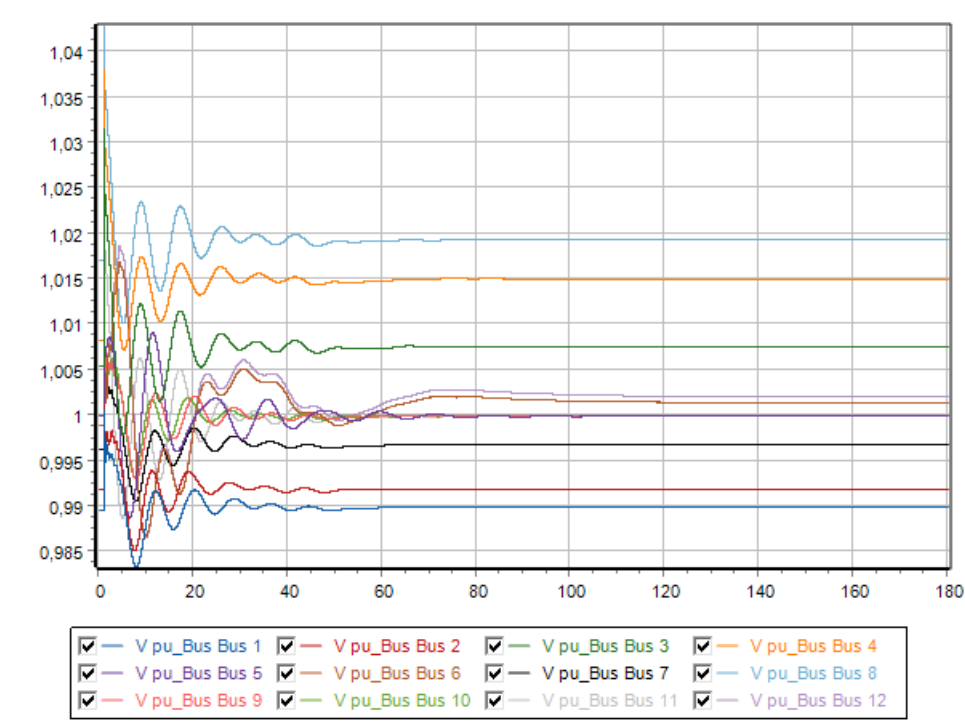
Β. Τάση

Η έντονη μεταβολή της ζήτησης έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο τις διακυμάνσεις της συχνότητας αλλά και σημαντικές μεταβολές στο μέγεθος της τάσης του δικτύου. Εάν δεν αποκατασταθεί το ενεργειακό ισοζύγιο, αυτή η διαταραχή μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνια υποβάθμιση της τάσης και τελικά στην κατάρρευση του δικτύου, όπως διαπιστώνεται από την Εικόνα 6.156.

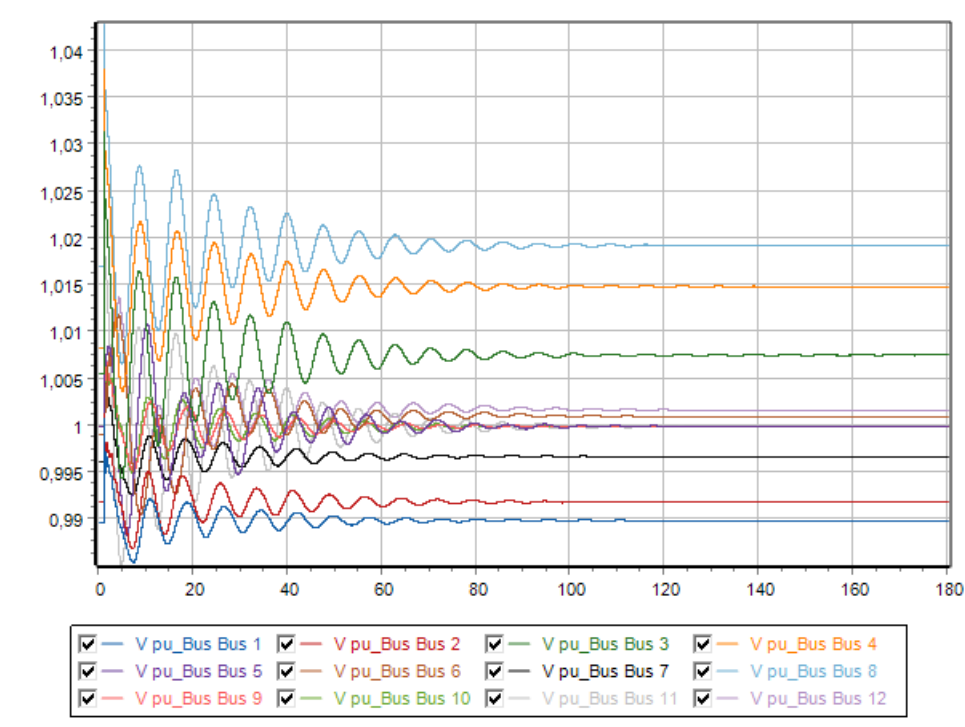
Με τον προγραμματισμό της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης, επιτυγχάνεται η αποτελεσματική ρύθμιση της τάσης του δικτύου. Όταν προκύπτει μια διαταραχή στο σύστημα, η τάση αυξάνεται στιγμιαία λόγω της ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ενέργειας. Ωστόσο, με την ταχεία απορρόφηση της πλεονάζουσας ισχύος από τα ηλεκτρικά οχήματα που φορτίζουν, η τάση επανέρχεται στην αρχική της τιμή. Οι Εικόνες 6.157, 6.158 και 6.159 απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης για Ddn 50, 100 και 200, αντίστοιχα.



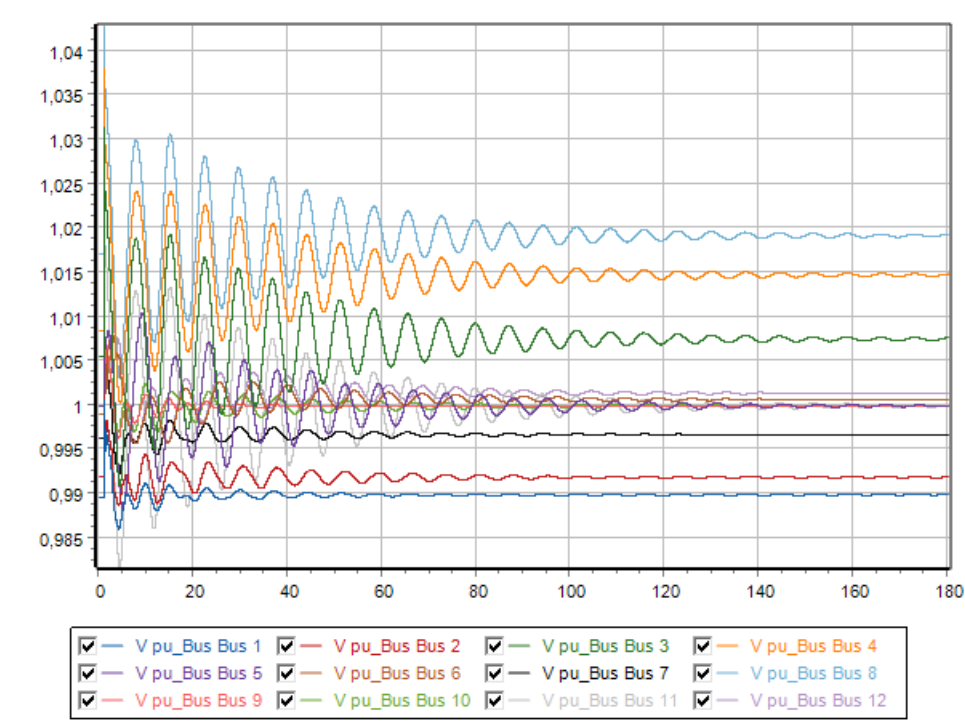
Εικόνα 6.156: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% ,απουσία G2V



Εικόνα 6. 157: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 50$



Εικόνα 6.158: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



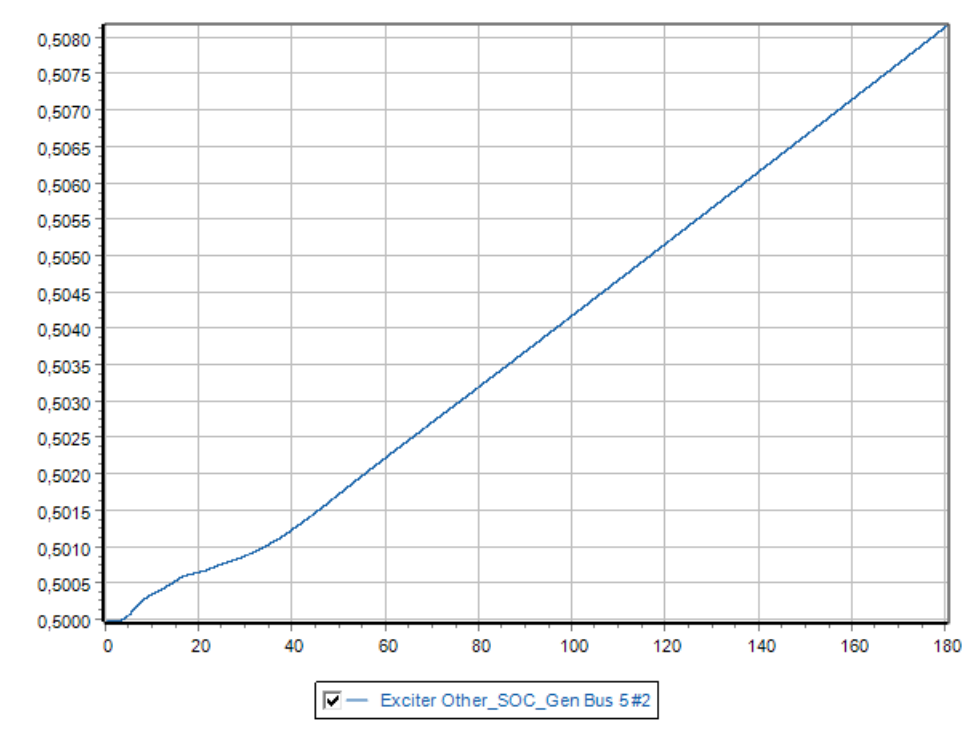
Εικόνα 6.159: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

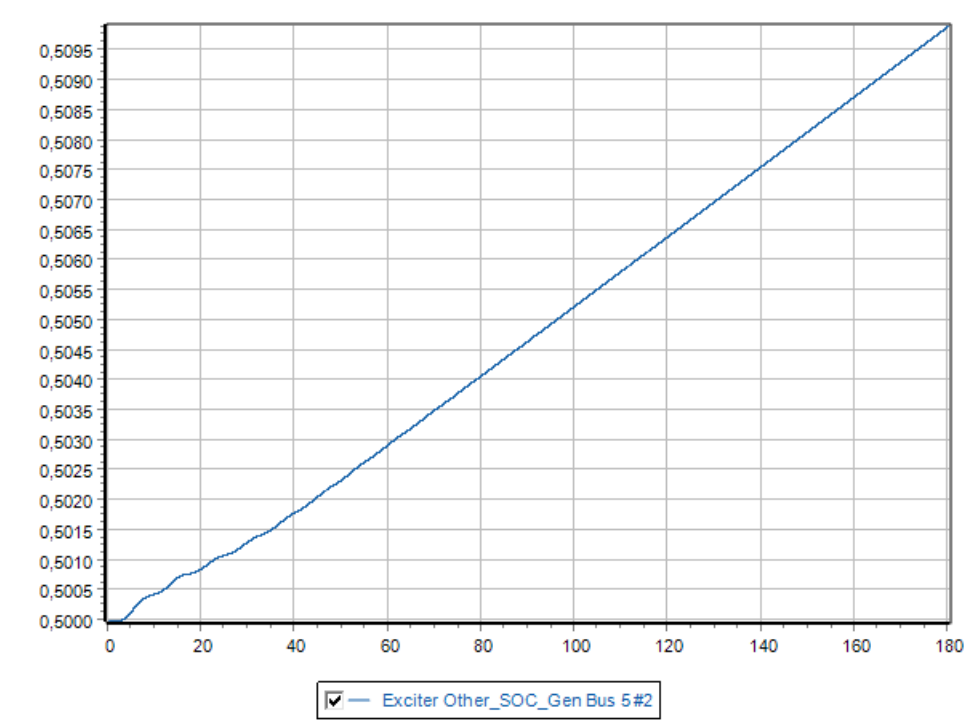
Μια υψηλότερη τιμή της παραμέτρου Ddn προκαλεί μεγαλύτερη μεταβολή στην κατάσταση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή η υψηλότερη τιμή του Ddn αυξάνει την ευαισθησία του συστήματος στις διακυμάνσεις της συχνότητας του δικτύου. Σύμφωνα με τη στρατηγική του Περιορισμένου Ελέγχου, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιδρούν πιο έντονα στις αλλαγές της συχνότητας, προσαρμόζοντας την απορρόφηση ισχύος τους με ταχύτερο ρυθμό. Αυτή η ταχύτερη απόκριση επιτρέπει στα οχήματα να απορροφούν ή να αποδίδουν ενέργεια ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση της ευστάθειας της συχνότητας και στη ρύθμιση της τάσης του συστήματος. Ο Πίνακας 6.20 συνοψίζει τα αποτελέσματα που αφορούν τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης. Οι Εικόνες 6.160, 6.161 και 6.162 απεικονίζουν τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης για τιμές του συντελεστή Ddn 50, 100 και 200, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 4.1

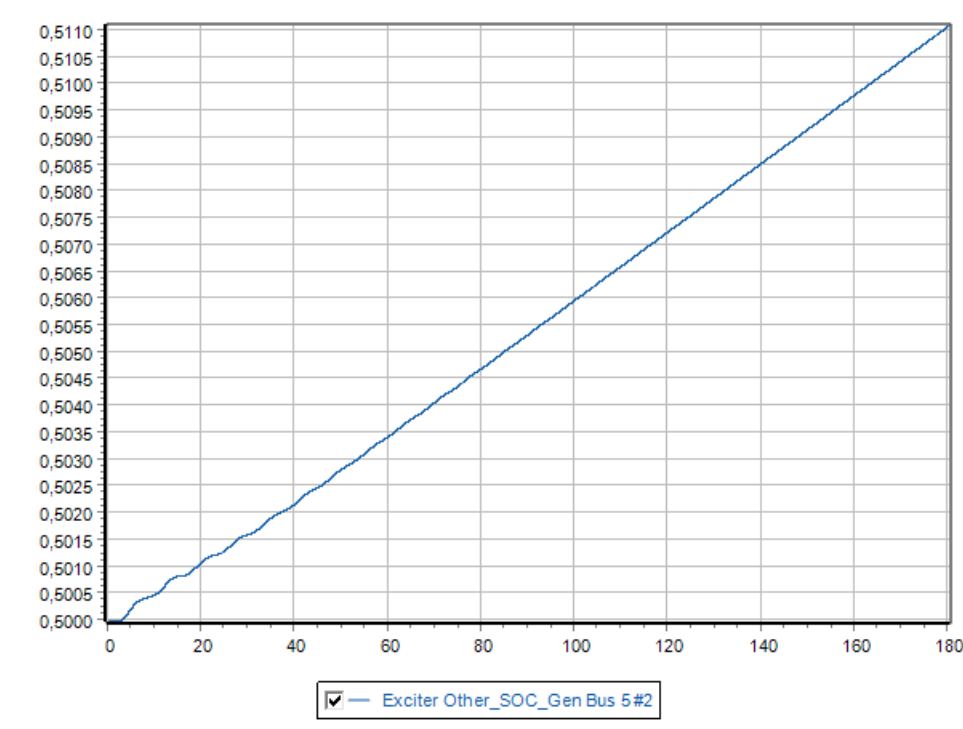
Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200
Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ΔSOC (%)	0.81	1	1.11



Εικόνα 6.160: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 50$



Εικόνα 6.161: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.162: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$

Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

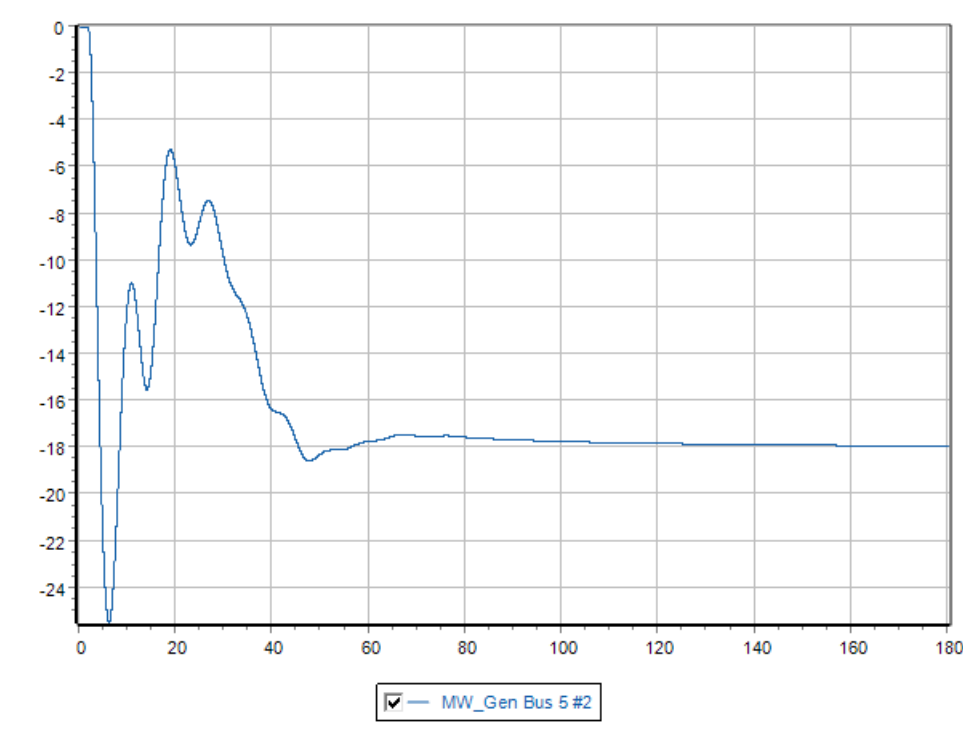
Όταν η παράμετρος Ddn αυξάνεται, τα ηλεκτρικά οχήματα γίνονται πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται η ποσότητα της ενεργού ισχύος που απορροφάται. Ο λόγος είναι ότι η υψηλότερη τιμή Ddn επιτρέπει στα οχήματα να προσαρμόζονται πιο γρήγορα και σε μεγαλύτερο βαθμό την απορρόφηση της ισχύος για να αντιμετωπίσουν τις διακυμάνσεις της συχνότητας. Οι Εικόνες 6.163, 6.164 και 6.165 απεικονίζουν τη μεταβολή της πραγματικής ισχύος για τιμές του συντελεστή Ddn 50, 100 και 200 αντίστοιχα.

Ενώ η άεργη ισχύς δεν εξαρτάται άμεσα από την παράμετρο Ddn , μπορεί να επηρεαστεί έμμεσα. Όταν τα ηλεκτρικά οχήματα αυξάνουν την απορρόφηση ενεργού ισχύος λόγω της υψηλής τιμής Ddn , μπορεί να προκύψει και αυξημένη ανάγκη για κατανάλωση άεργης ισχύος για την υποστήριξη της νέας κατανομής ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί η άεργη ισχύς είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της τάσης του δικτύου, και η αύξηση της απορρόφησης ενεργού ισχύος μπορεί να επηρεάσει τη συνολική ισορροπία του δικτύου. Οι Εικόνες 6.166, 6.167 και 6.168 απεικονίζουν τη μεταβολή της αέργου ισχύος για τιμές του συντελεστή Ddn 50, 100 και 200 αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.21

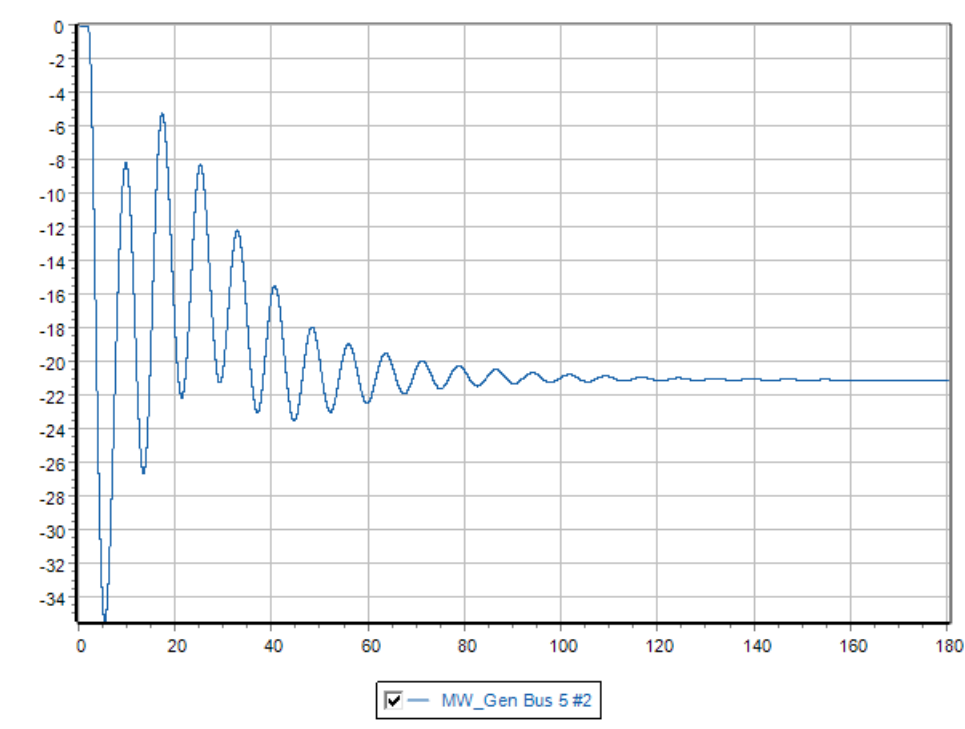
συνοψίζει τα αποτελέσματα των τιμών ισορροπίας της πραγματικής και αέργου ισχύος εντός του χρόνου παρατήρησης.

*Πίνακας 6.21: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 4.1*

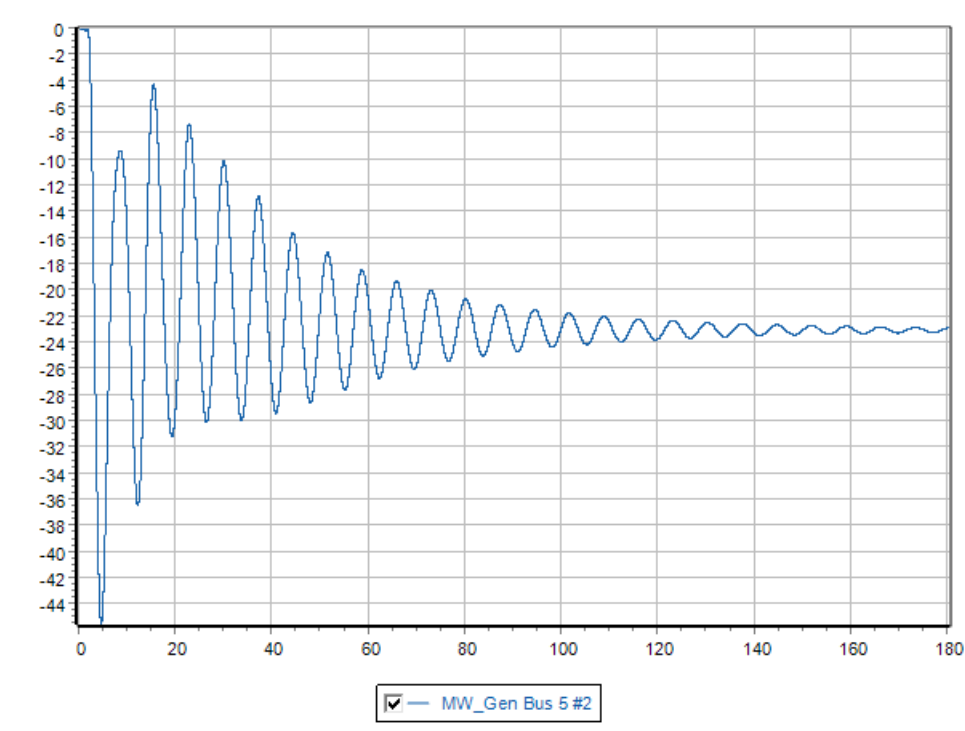
Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200
Πραγματική Ισχύς (MW)	-18	-21	-23
Αεργος Ισχύς (MVAR)	-19	-18.2	-17.75



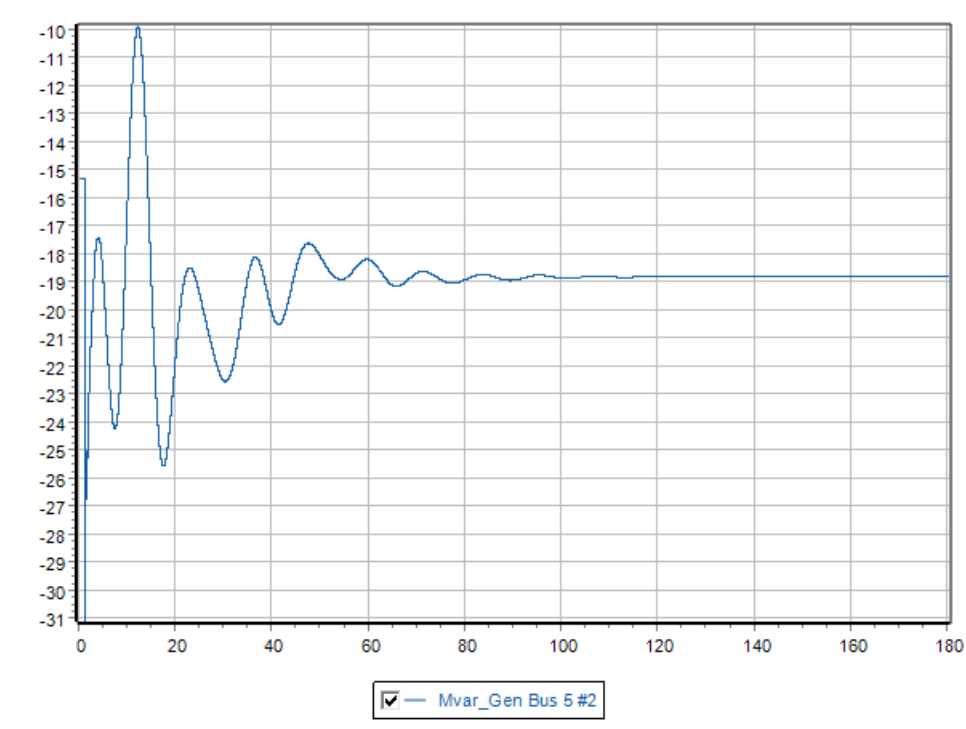
Εικόνα 6.163: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με ddn = 50



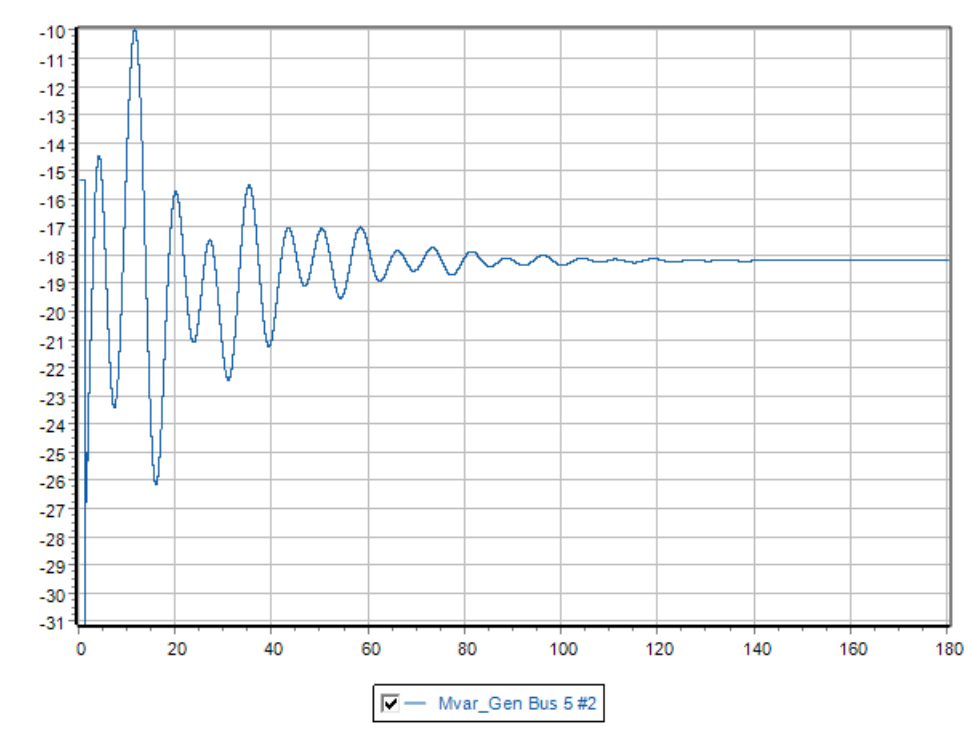
Εικόνα 6.164: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



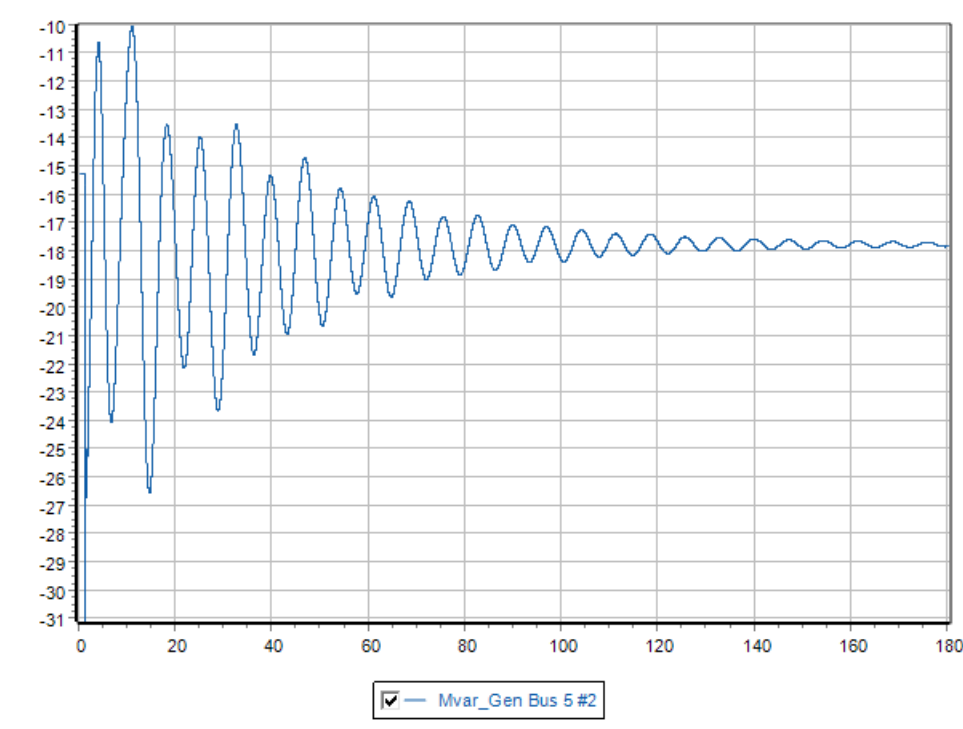
Εικόνα 6.165: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.166: Άεργος Ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 50$



Εικόνα 6.167: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.168: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 4 κατά 10% , παρουσία G2V με $ddn = 200$

Σενάριο 4.2: Μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% (50 MW)

Α. Συχνότητα

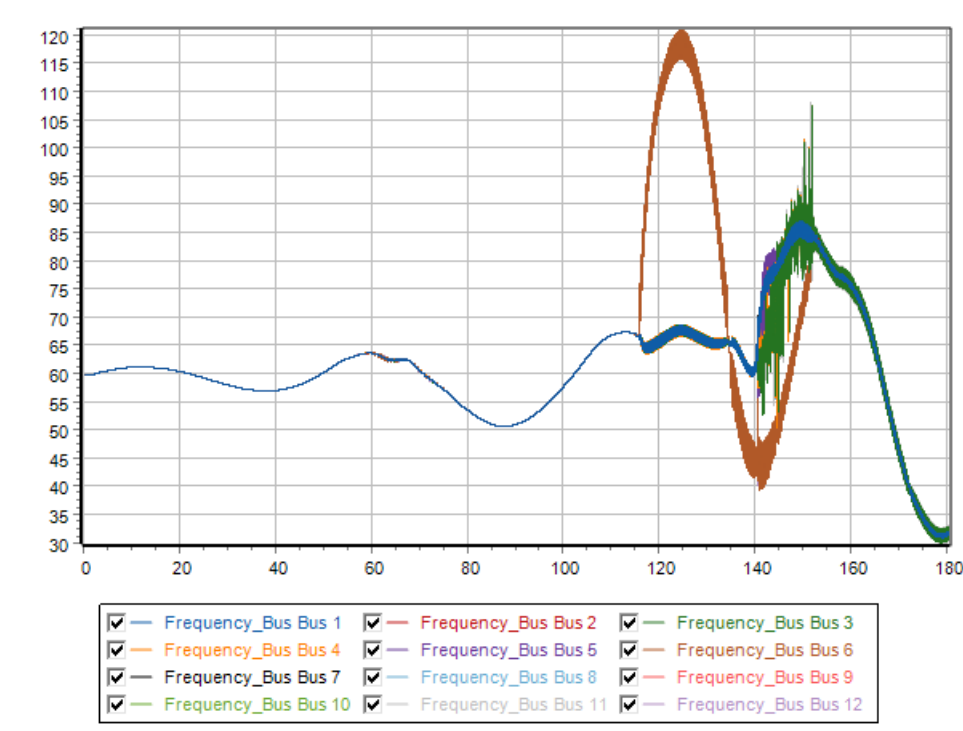
Η μείωση της ζήτησης κατά 50 MW προκαλεί εντονότερες ταλαντώσεις στη συχνότητα του δικτύου λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους της μεταβολής, όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.169.

Με την εφαρμογή της V2G παρατηρούνται μεγαλύτερα σφάλματα συχνότητας από εκείνα που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο σενάριο. Η αντίστροφη σχέση μεταξύ της παραμέτρου Ddn και του σφάλματος συχνότητας επαληθεύεται, καθώς μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου συνήθως οδηγεί σε μειωμένα σφάλματα συχνότητας. Ο Πίνακας 6.22 συνοψίζει τις τιμές των μόνιμων σφαλμάτων συχνότητας. Οι Εικόνες 6.170, 6.171, 6.172 και 6.173 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας για τιμές Ddn 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα.

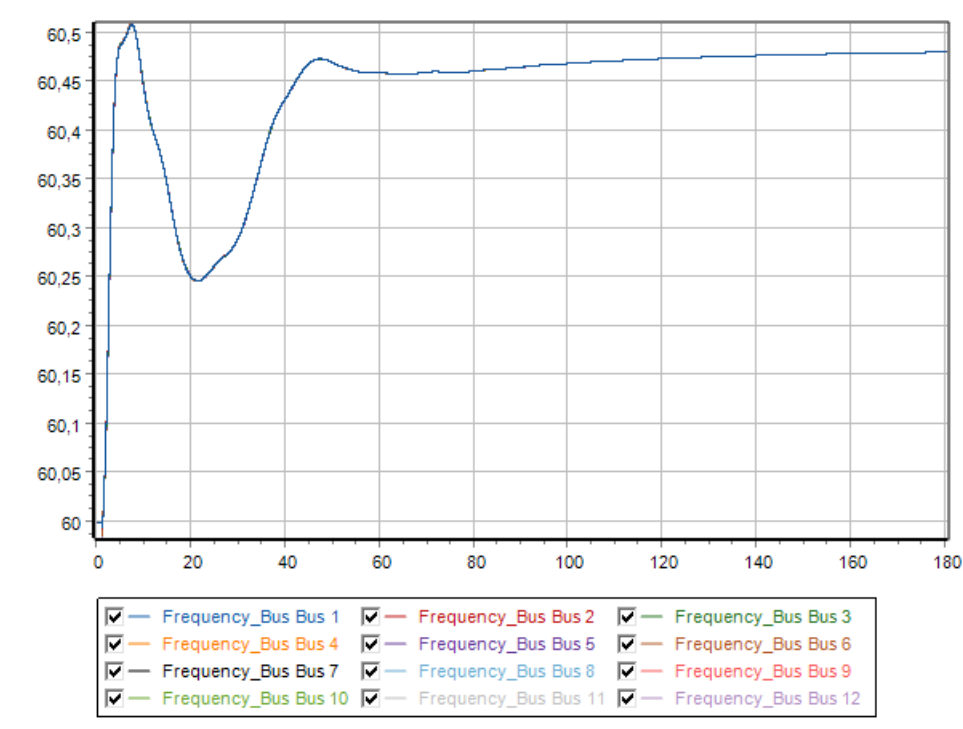
Πίνακας 6.22: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 4.2

Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200	300
------------------------	----	-----	-----	-----

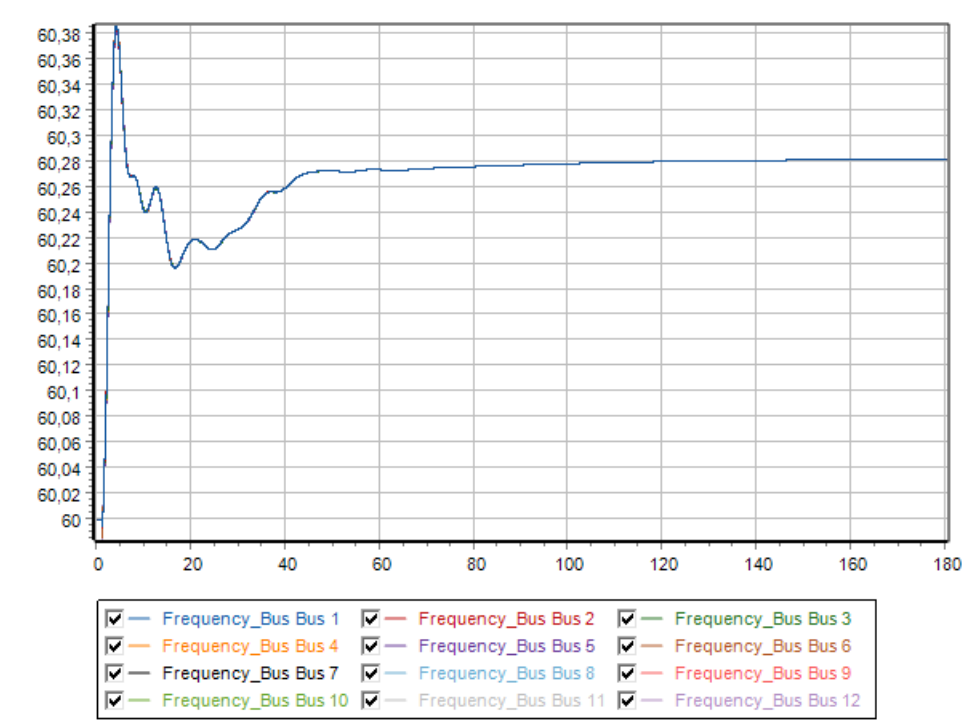
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	-0.48	-0.28	-0.158	-0.107
--	-------	-------	--------	--------



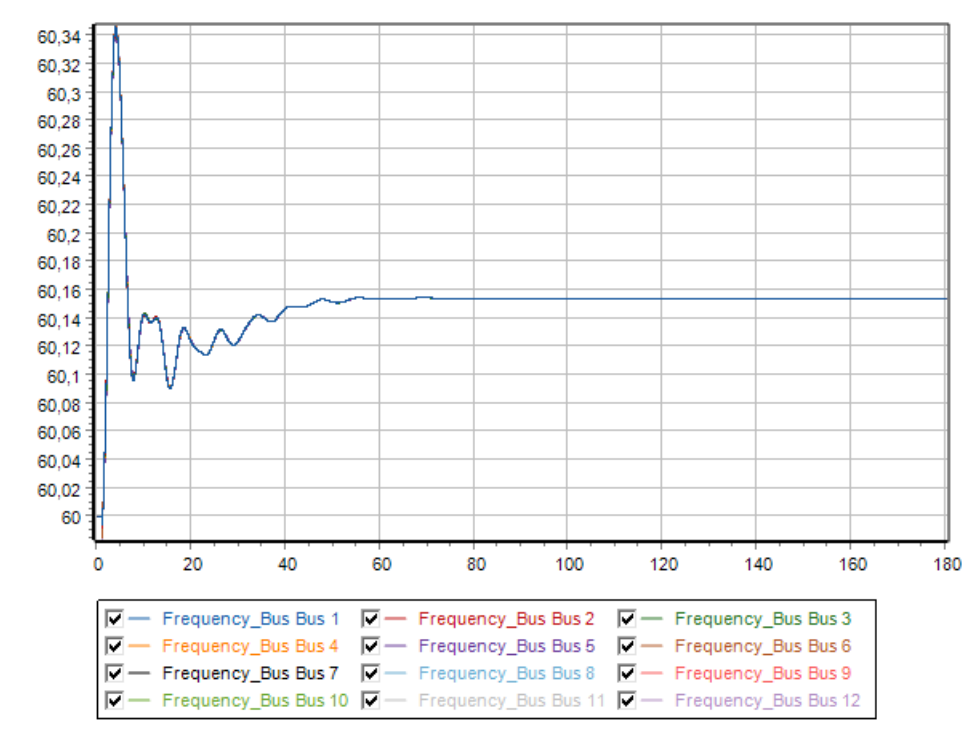
Εικόνα 6. 169: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία G2V



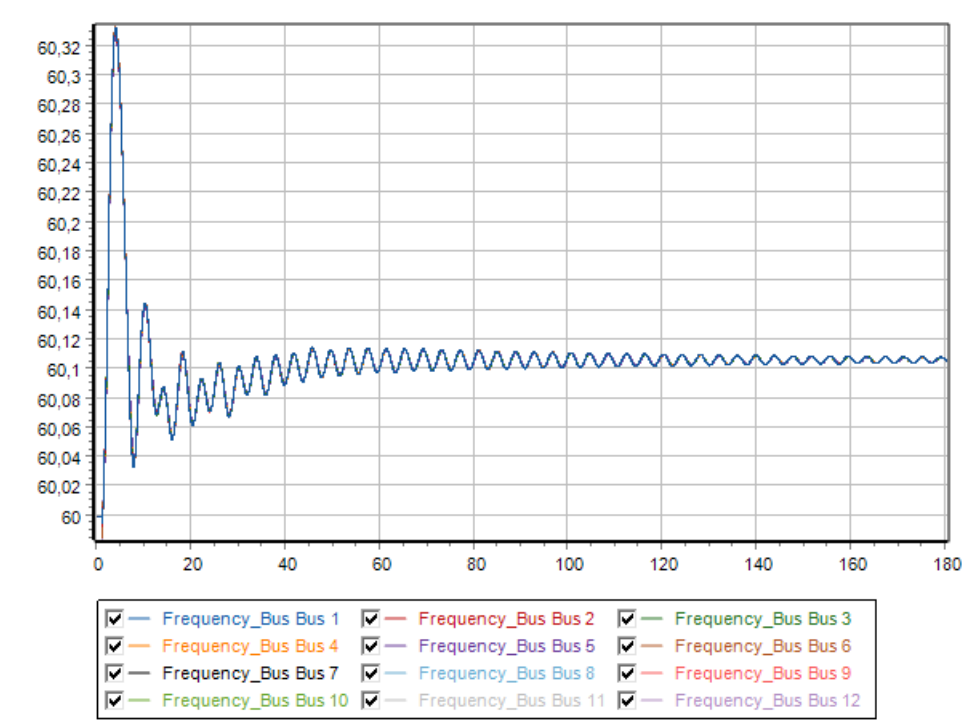
Εικόνα 6.170: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$



Εικόνα 6.171: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.172: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$

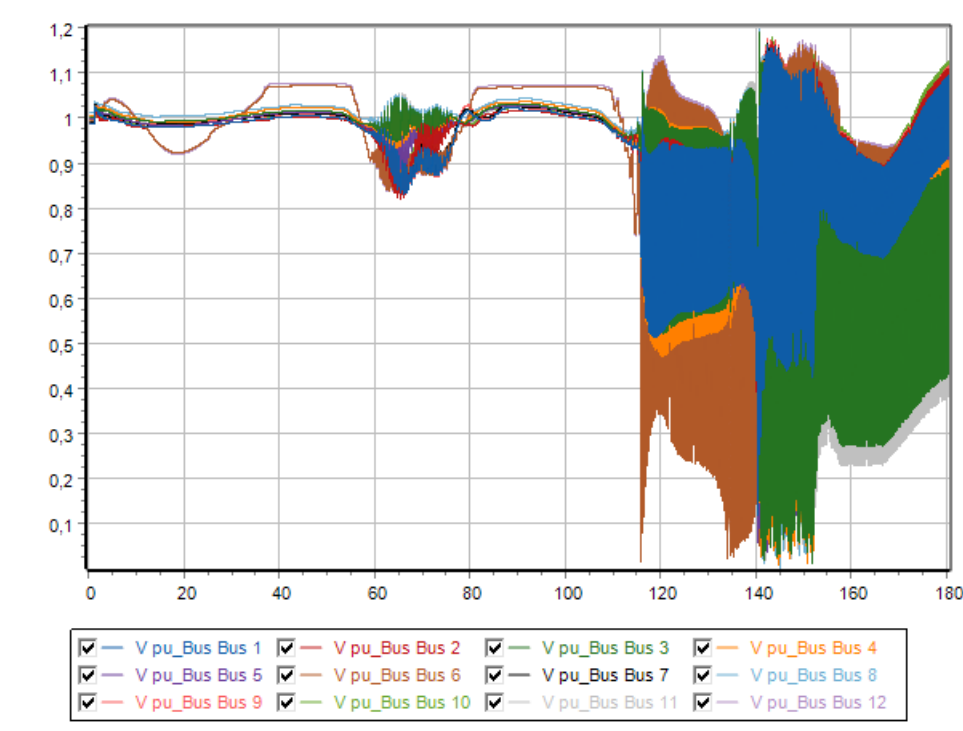


Εικόνα 6.173: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$

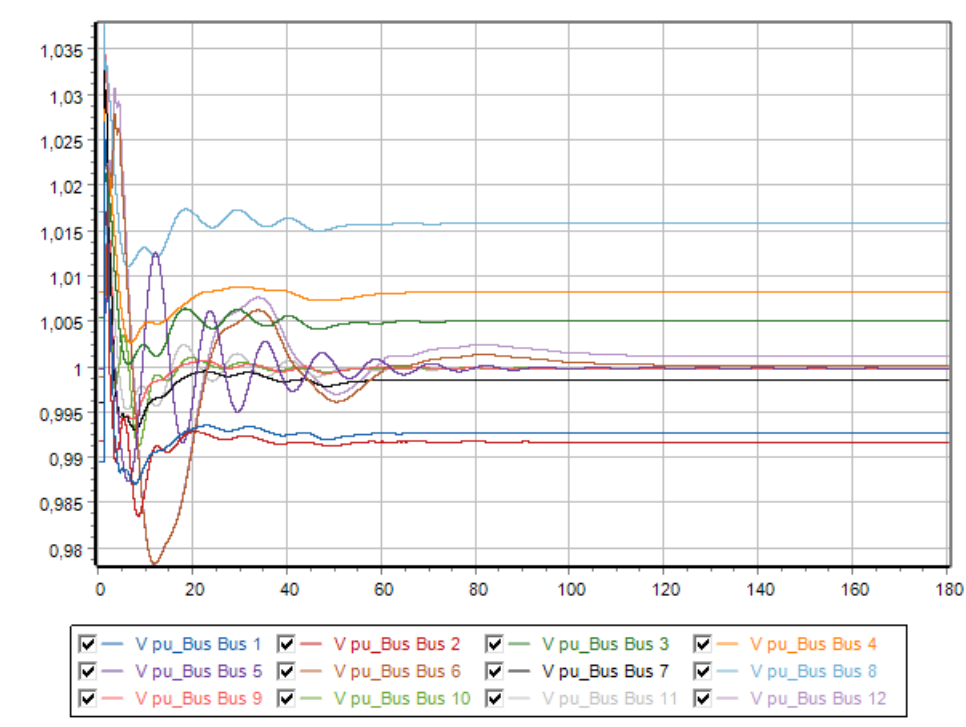
Β. Τάση

Η διαταραχή της μείωσης της ζήτησης κατά 50 MW προκαλεί μεγάλη διακύμανση στην τάση. Η Εικόνα 6.174 απεικονίζει αυτή τη διακύμανση στην τάση, απουσία της λειτουργίας V2G.

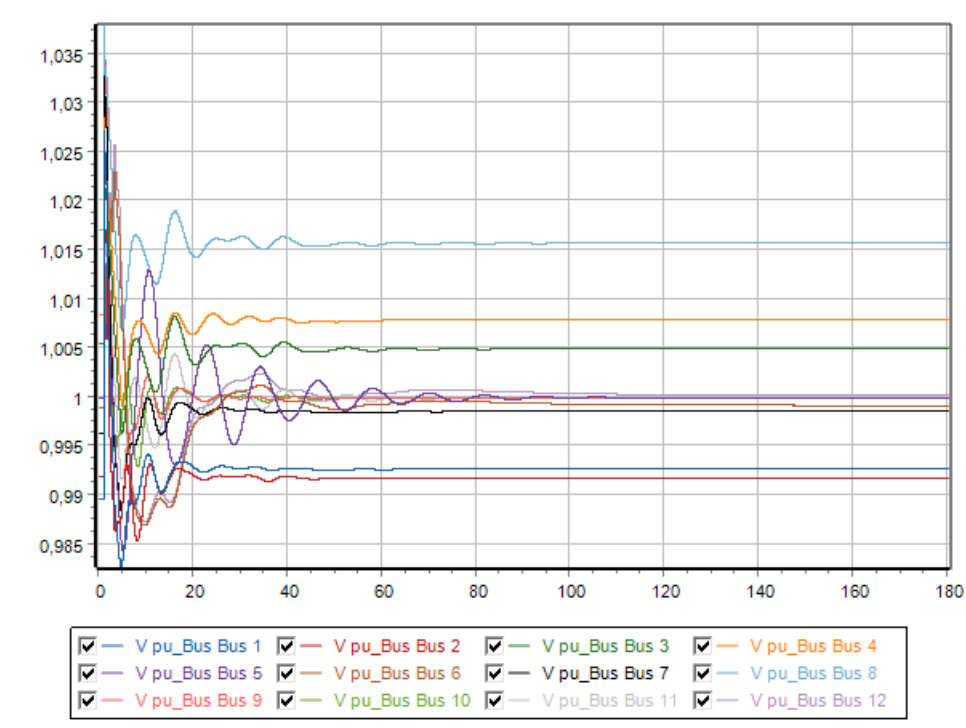
Στη στρατηγική G2V, τα ηλεκτρικά οχήματα απορροφούν την υπερβάλλουσα ενέργεια από το δίκτυο. Οι ρυθμισμένες τιμές της παραμέτρου Ddn επαναφέρουν την τάση στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Οι Εικόνες 6.175, 6.176, 6.177 και 6.178 απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης μετά την είσοδο της διαταραχής για τιμές Ddn 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα.



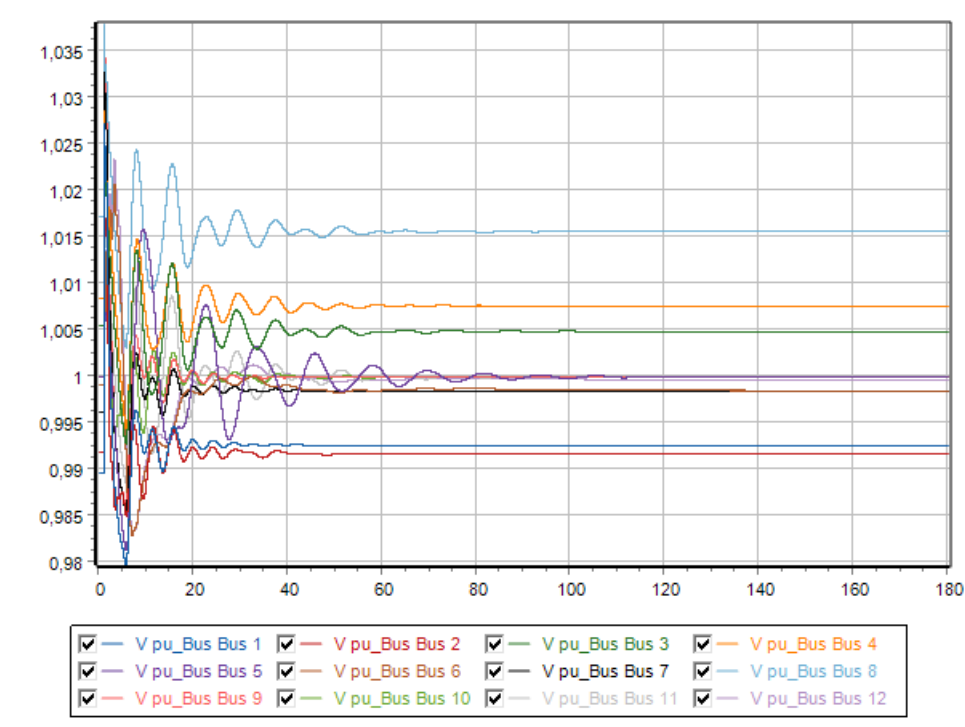
Εικόνα 6.174: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% ,απουσία G2V λειτουργίας



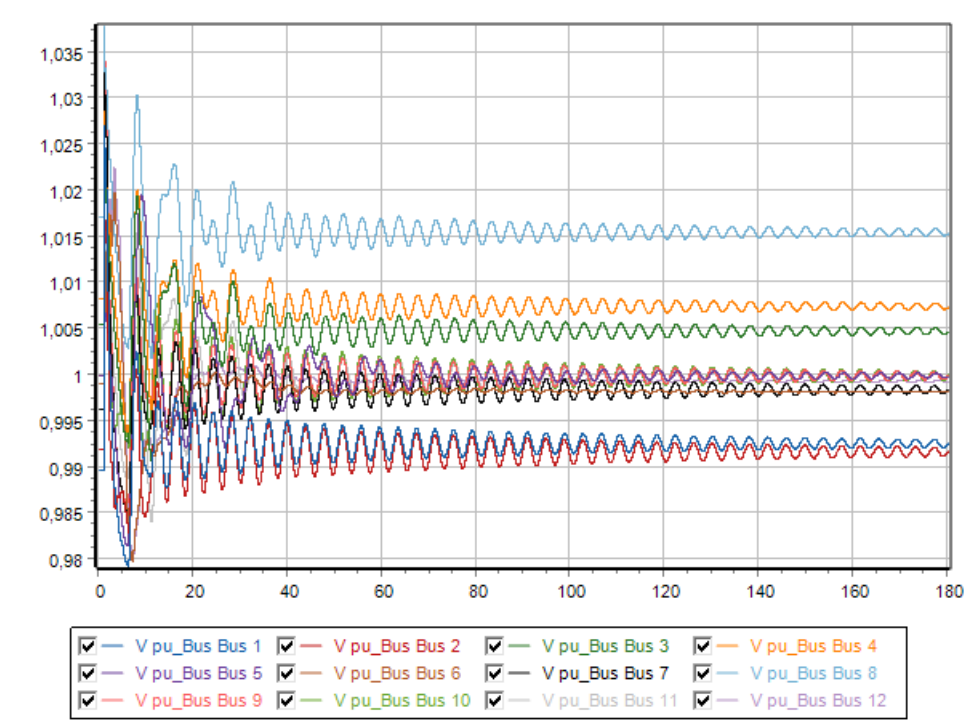
Εικόνα 6.175: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddh = 50$



Εικόνα 6.176: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddh = 100$



Εικόνα 6.177: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$



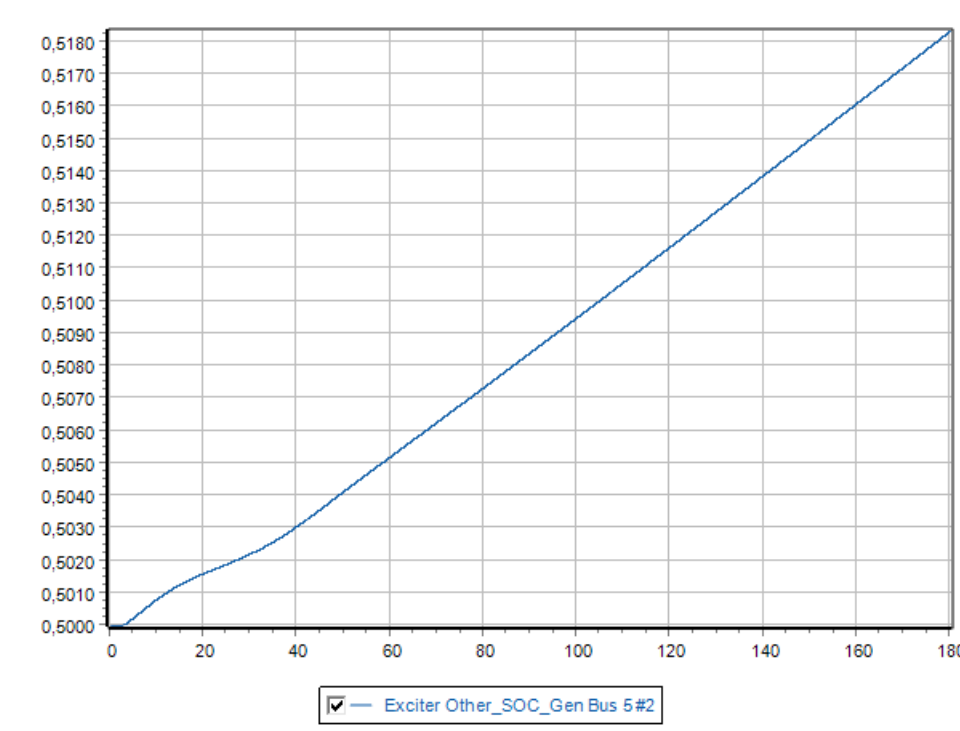
Εικόνα 6.178: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

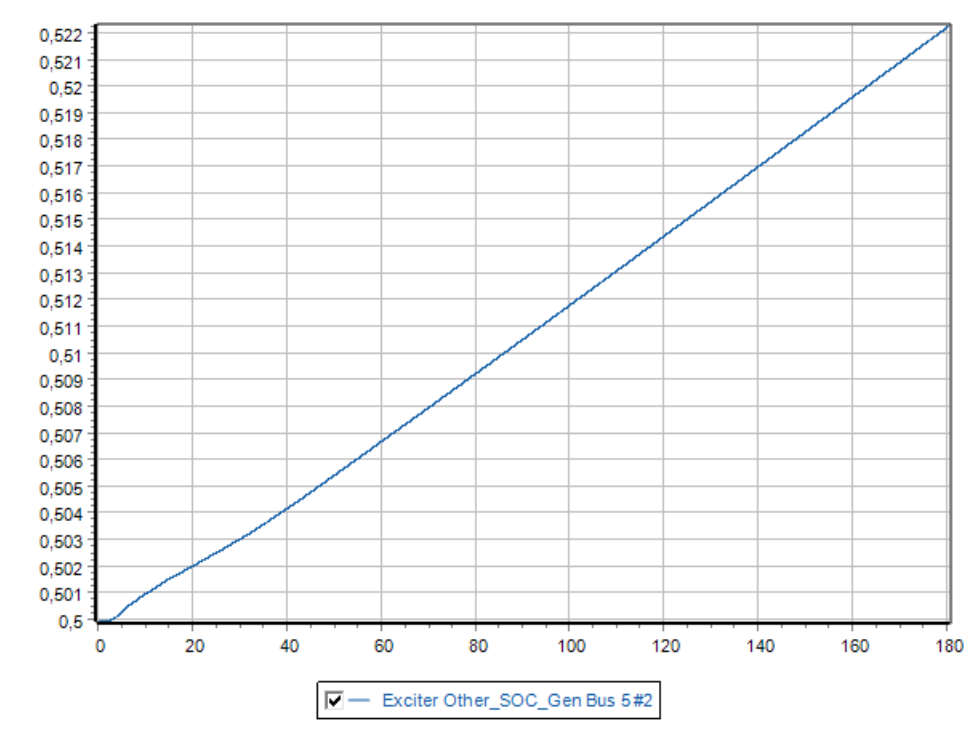
Με μια υψηλότερη τιμή της D_{dn} , το σύστημα αντιδρά πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ένταση στις αλλαγές της συχνότητας. Επειδή υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο λόγω μείωσης της ζήτησης, τα οχήματα απορροφούν περισσότερη ενέργεια για να προσαρμοστούν στην νέα κατάσταση συχνότητας. Ο Πίνακας 6.23 συνοψίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα της μεταβολής της κατάστασης φόρτισης. Οι Εικόνες 6.179, 6.180, 6.181 και 6.182 αναπαριστούν τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης για τιμές του συντελεστή D_{dn} 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.23: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 4.2

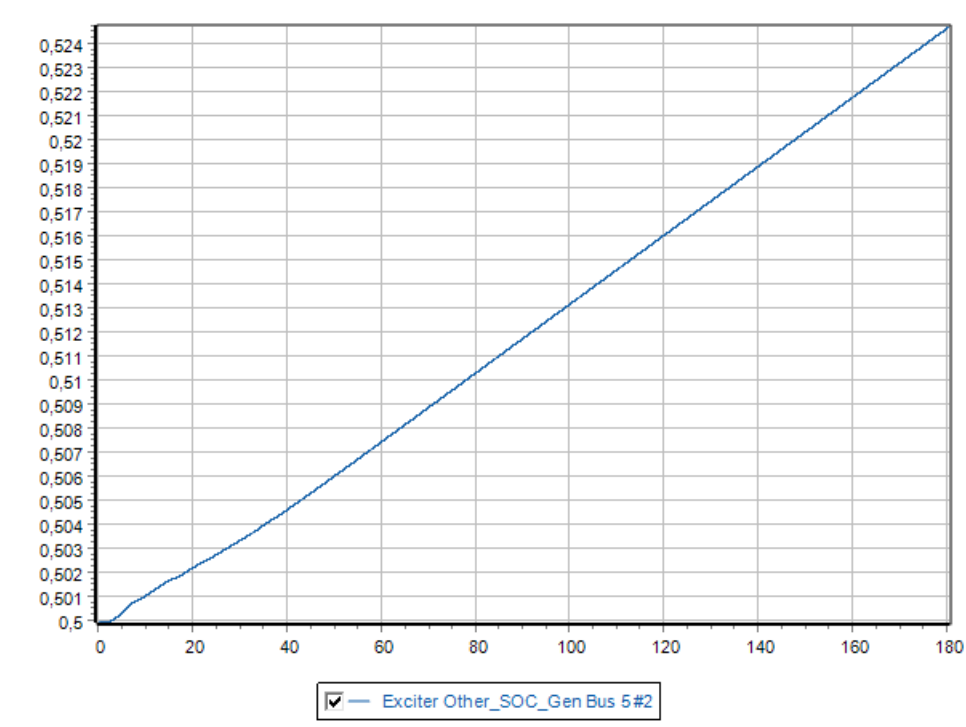
Συντελεστής D_{dn} (pu)	50	100	200	300
Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ΔSOC (%)	1.84	2.2	2.45	2.5



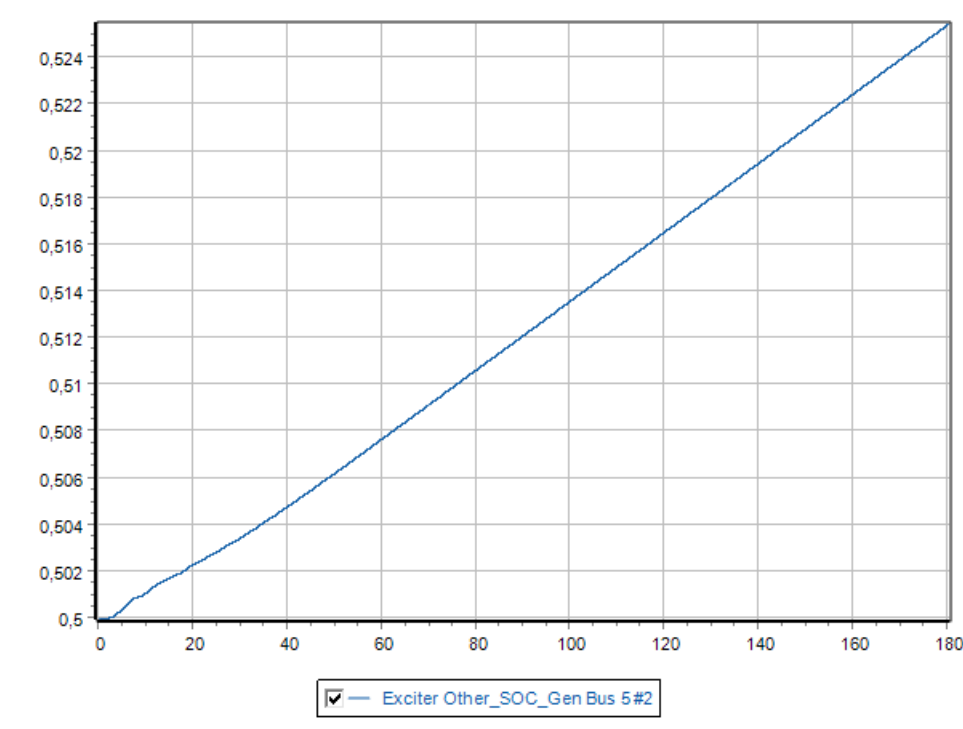
Εικόνα 6.179: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20%, παρουσία $G2V$ με $ddn = 50$



Εικόνα 6.180: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.181: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.182: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$

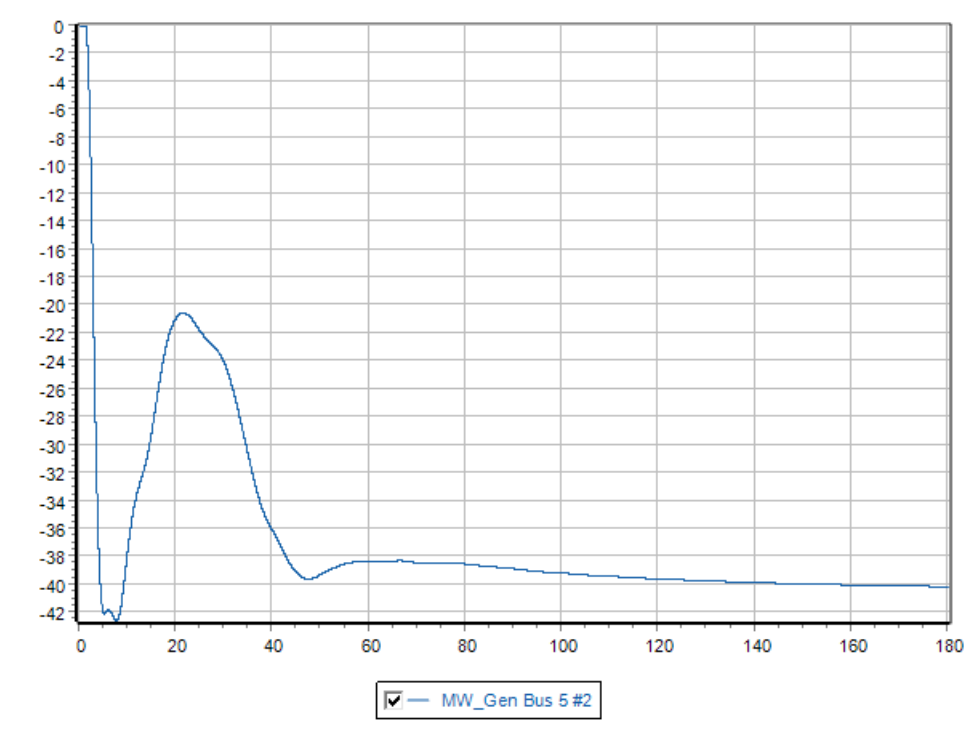
Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

Με την αύξηση της τιμής Ddn αυξάνεται η ποσότητα ενεργού ισχύος που απορροφάται από τα οχήματα. Οι Εικόνες 6.183, 6.184, 6.185 και 6.186 απεικονίζουν τη μεταβολή της ενεργού ισχύος για τιμές Ddn 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα.

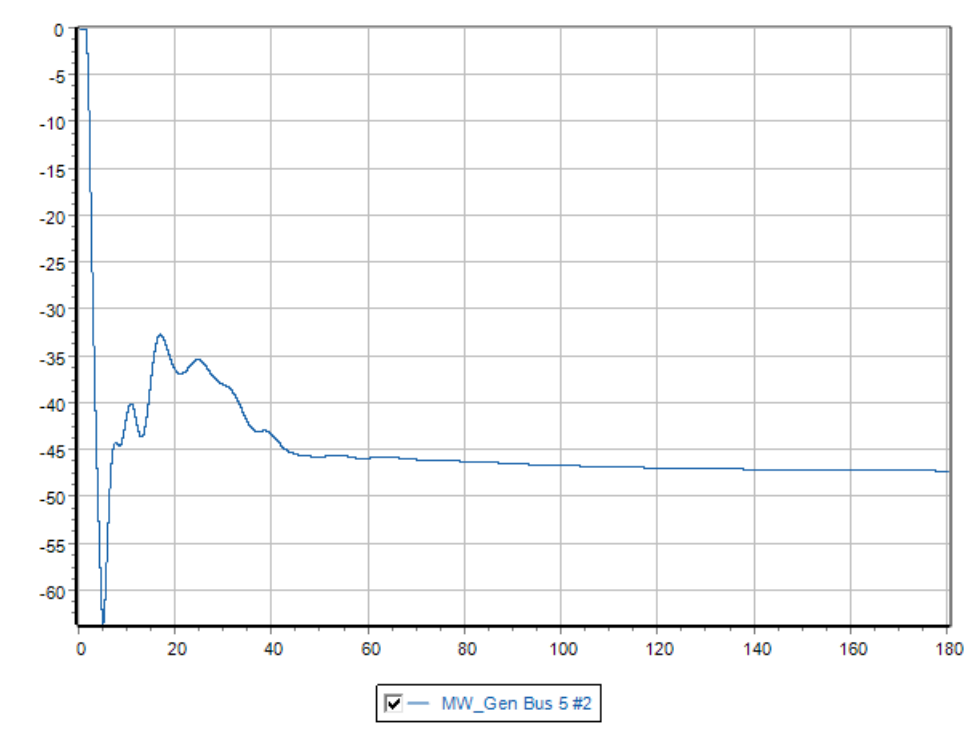
Η άεργος ισχύς σταδιακά που καταναλώνεται αυξάνει και προσαρμόζεται για να υποστηρίξει την τάση του δικτύου. Οι Εικόνες 6.187, 6.188, 6.189 και 6.190 απεικονίζουν τη μεταβολή της αέργου ισχύος για τιμές Ddn 50, 100, 200 και 300, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.24 συνοψίζει τα αποτελέσματα της πραγματικής και αέργου ισχύος για τις διάφορες τιμές του συντελεστή Ddn .

Πίνακας 6.24: Αποτελέσματα πραγματικής και αέργου ισχύος της μονάδας αποθήκευσης
Σεναρίου 4.2

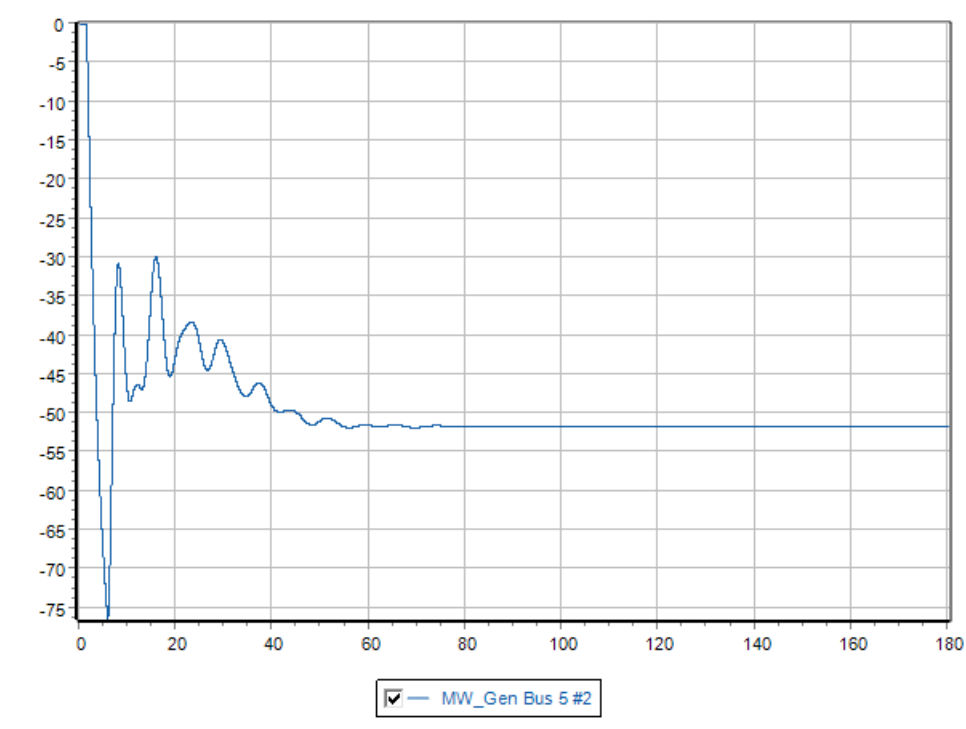
Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200	300
Πραγματική Ισχύς (MW)	-40	-47.12	-51.6	-53.3
Άεργος Ισχύς (MVAR)	-6.43	-4.77	-3.7	-3.26



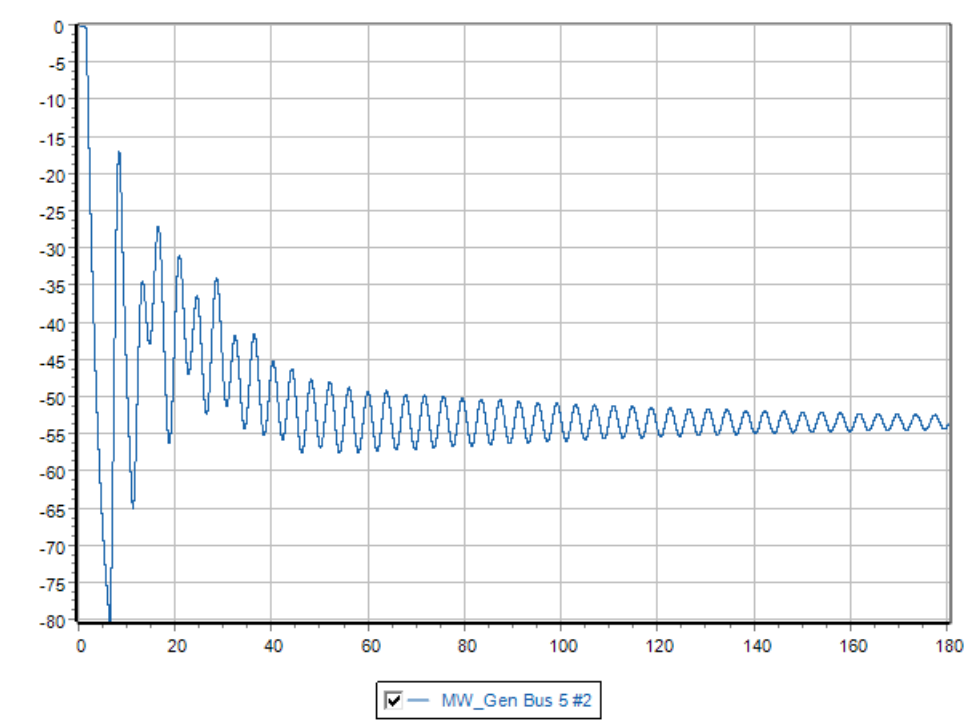
Εικόνα 6.183: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 50$



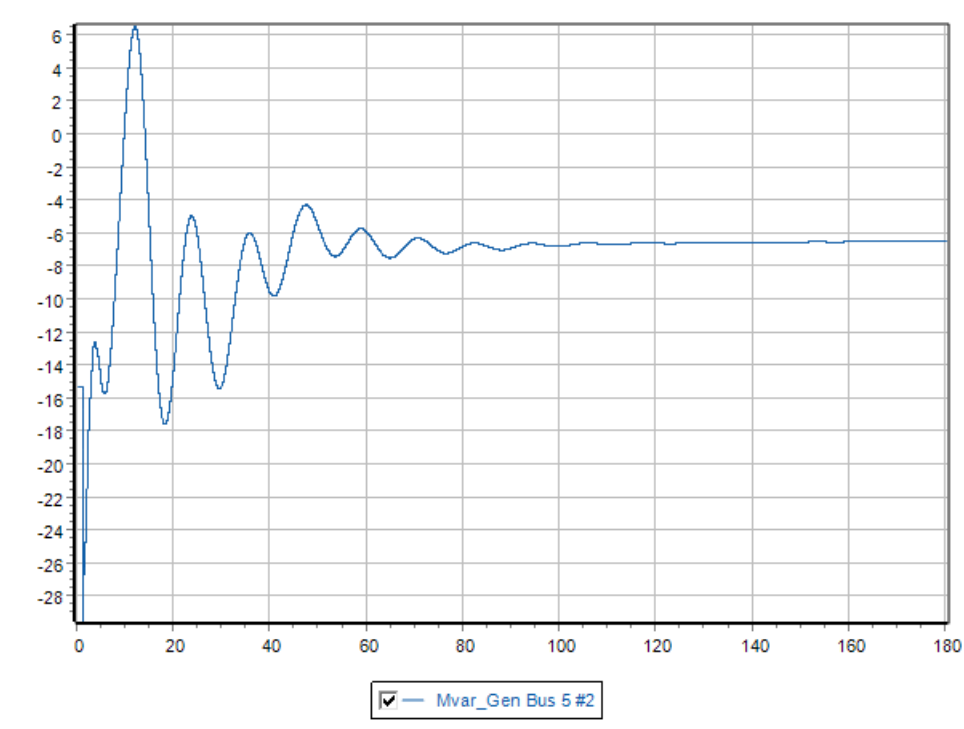
Εικόνα 6.184: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



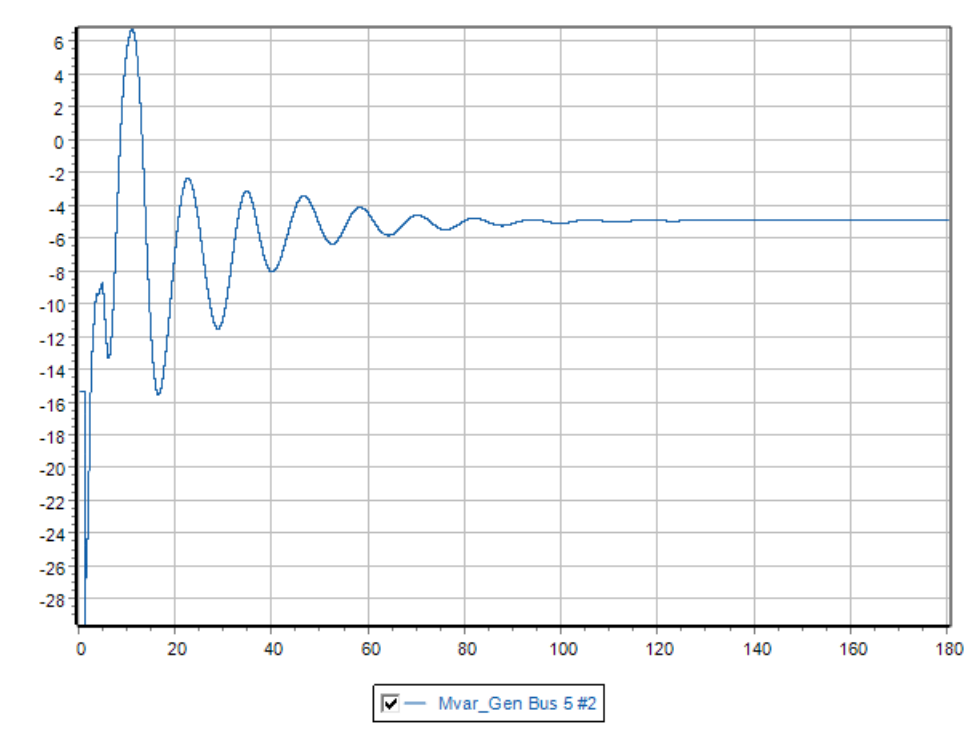
Εικόνα 6.185: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 200$



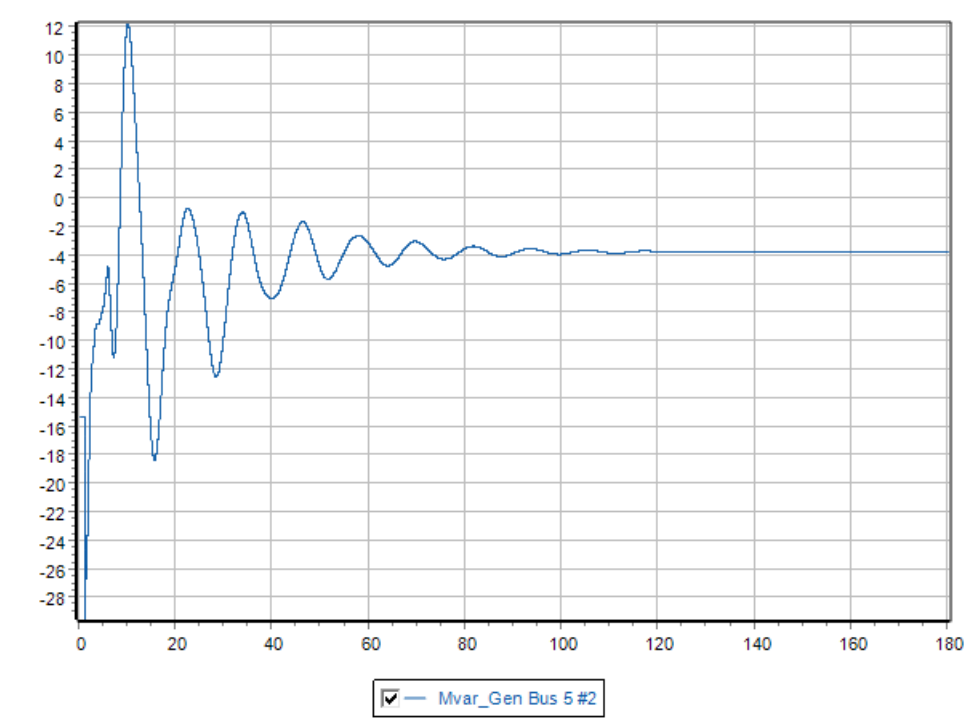
Εικόνα 6.186: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 300$



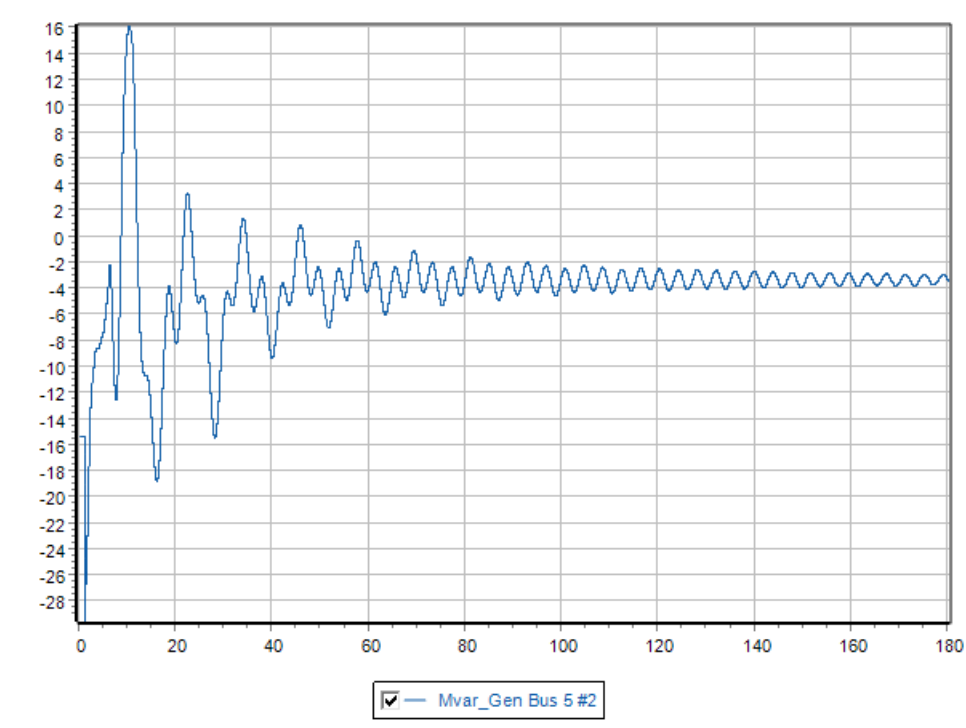
Εικόνα 6.187: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 50$



Εικόνα 6.188: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20% , παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.189: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20%, παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.190: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την μείωση της ζήτησης του φορτίου στον ζυγό 2 κατά 20%, παρουσία G2V με $ddn = 300$

Σενάριο 5: Αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου (G2V)

Στο Σενάριο 5 εξετάζεται η αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου. Οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς πάνω από την ονομαστική τους ισχύ. Η ονομαστική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει υπό βέλτιστες συνθήκες ανέμου. Σε βραχυχρόνιες συνθήκες υψηλής ταχύτητας ανέμου, μια ανεμογεννήτρια μπορεί να παράξει λίγο περισσότερη ενέργεια από την ονομαστική της.

Σενάριο 5.1: Αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% (10 MW)

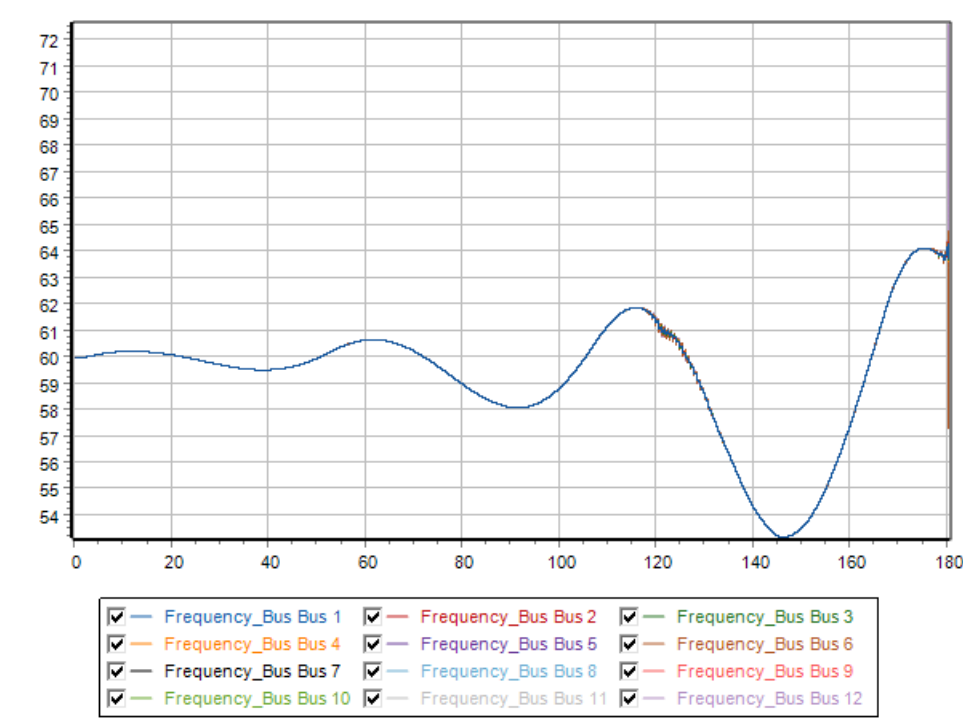
Α. Συχνότητα

Η αύξηση παραγωγής κατά 10% θα αντιστοιχεί σε επιπλέον 10 MW, ανεβάζοντας τη συνολική ισχύ του αιολικού πάρκου στα 110 MW. Αμέσως μετά την εισαγωγή της διαταραχής, υπάρχει μια αρχική απότομη αύξηση της συχνότητας η οποία ακολουθείται από ταλάντωση. Η Εικόνα 6.191 απεικονίζει τη μεταβολή της συχνότητας του συστήματος μετά την είσοδο της διαταραχής, απουσία της V2G λειτουργίας.

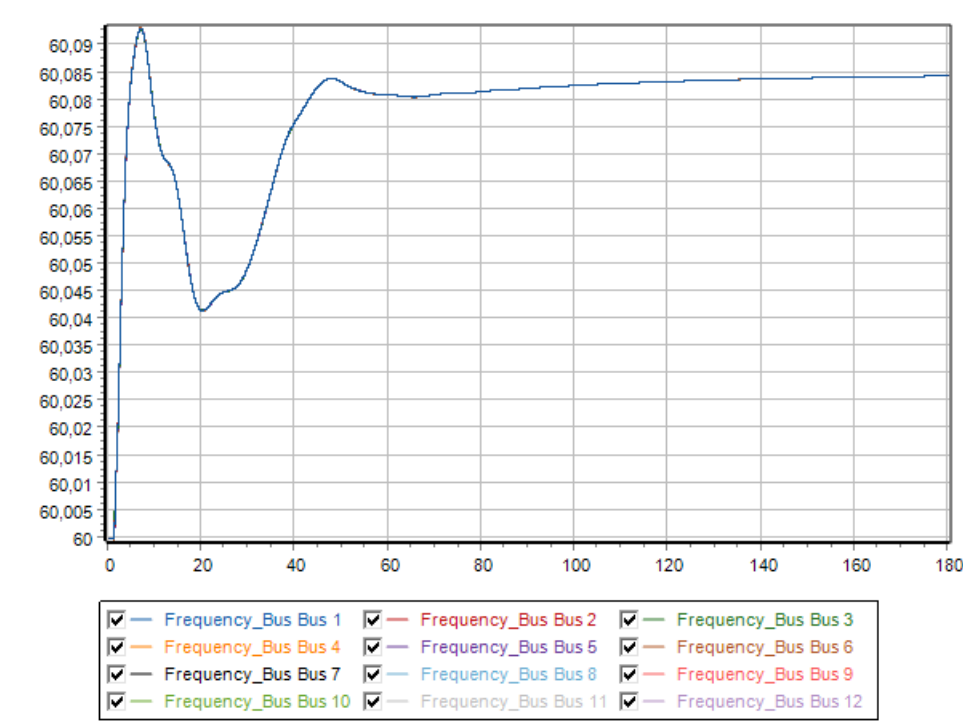
Με την ύπαρξη της φόρτισης, (G2V) η σωστή ρύθμιση της παραμέτρου Ddn επιτρέπει την καλύτερη προσαρμογή της φόρτισης των οχημάτων, γεγονός που συμβάλλει στη σταδιακή βελτίωση του σφάλματος συχνότητας για τις διαφορετικές τιμές της. Ο Πίνακας 6.25 συνοψίζει τα αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας. Οι Εικόνες 6.192, 6.193, 6.194, 6.195 και 6.196 απεικονίζουν τη μεταβολή της συχνότητας για Ddn 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.25: Αποτελέσματα μόνιμου σφάλματος συχνότητας Σεναρίου 5.1

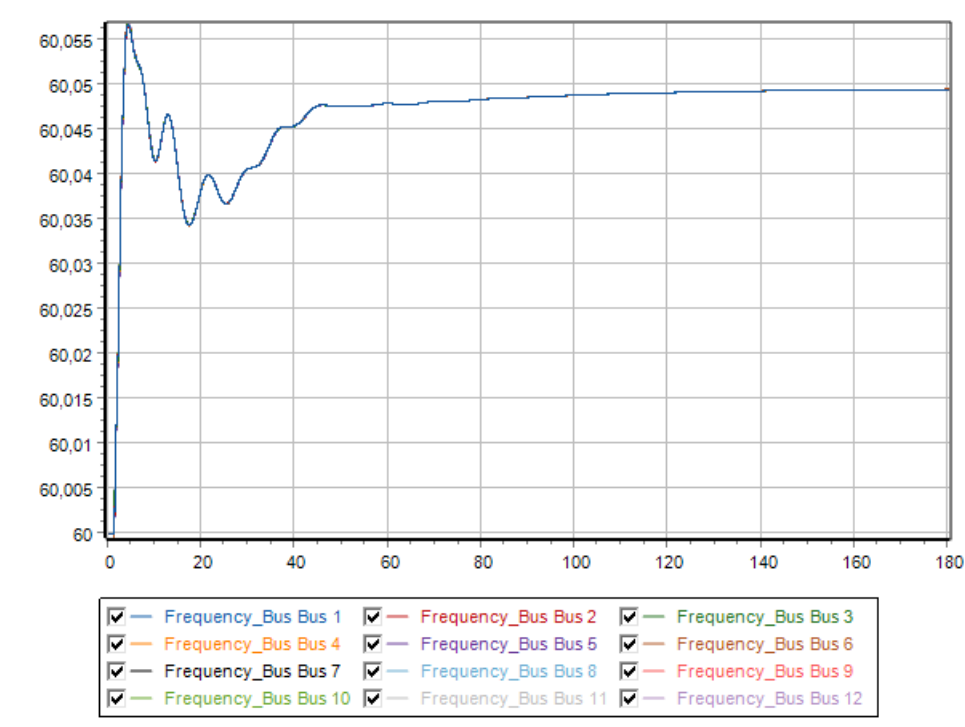
Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200	300	400
Μόνιμο Σφάλμα Συχνότητας Δf (Hz)	-0.085	-0.05	-0.027	-0.019	-0.014



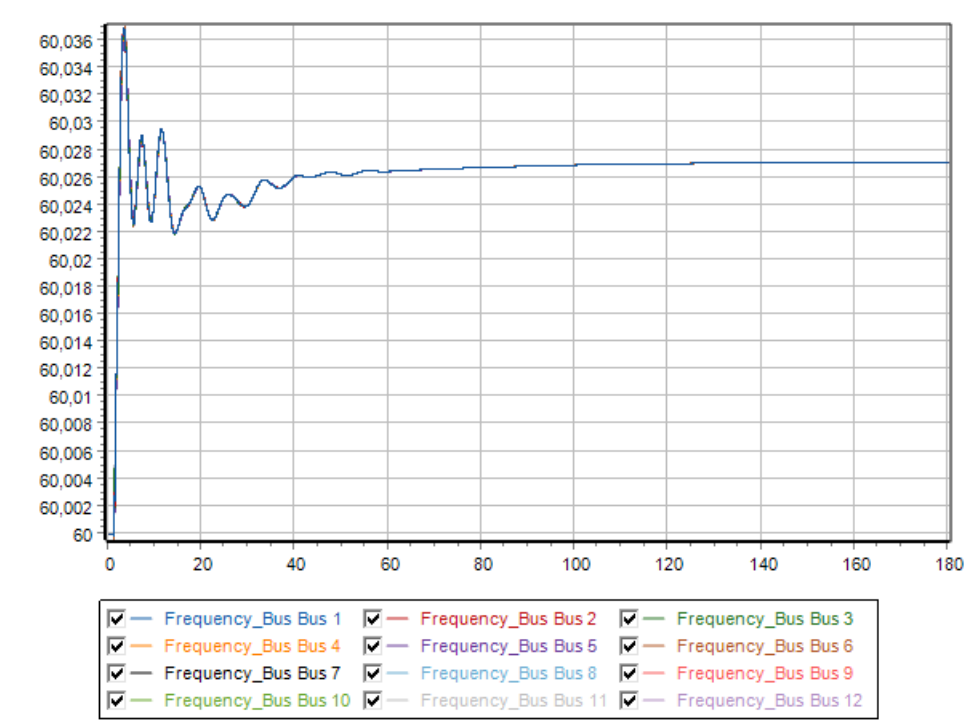
Εικόνα 6. 191: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,απουσία G2V



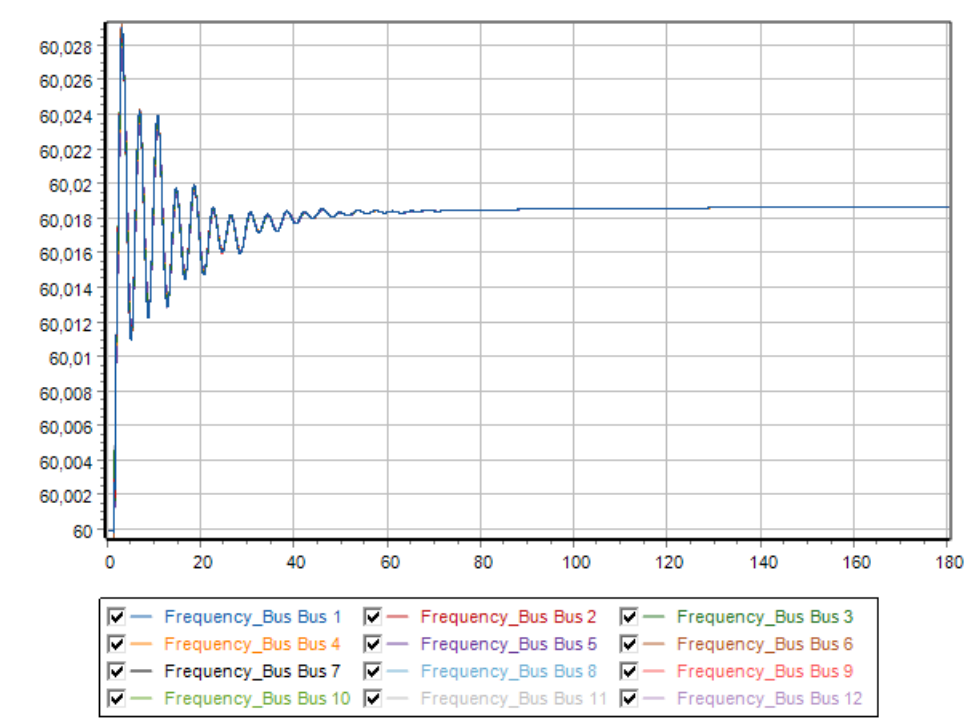
Εικόνα 6.192: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$



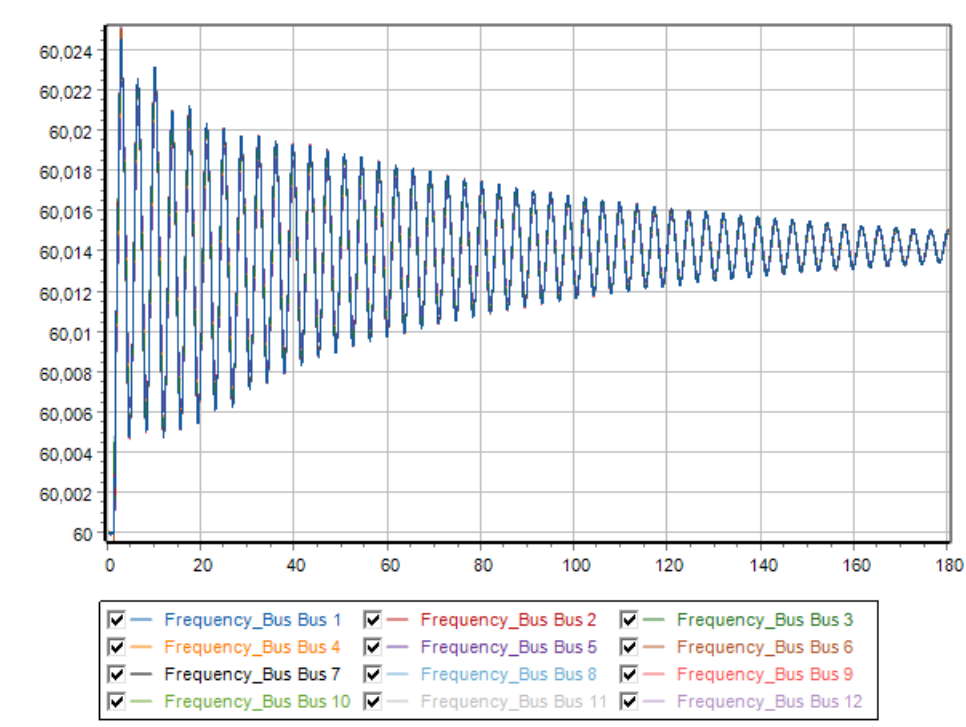
Εικόνα 6.193: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.194: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.195: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$

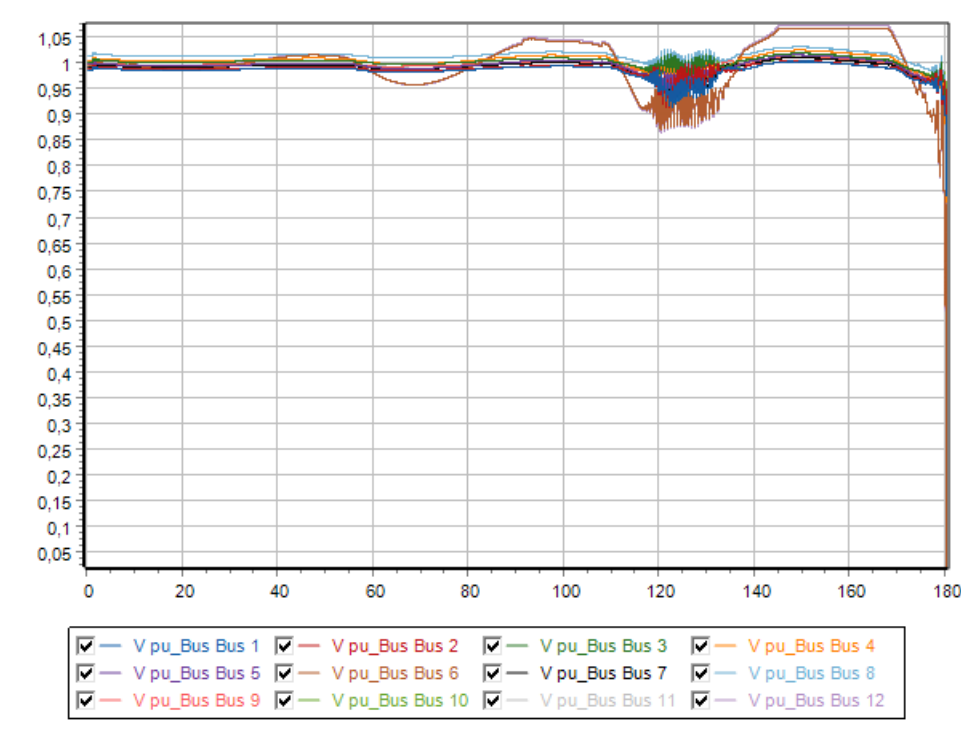


Εικόνα 6.196: Μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$

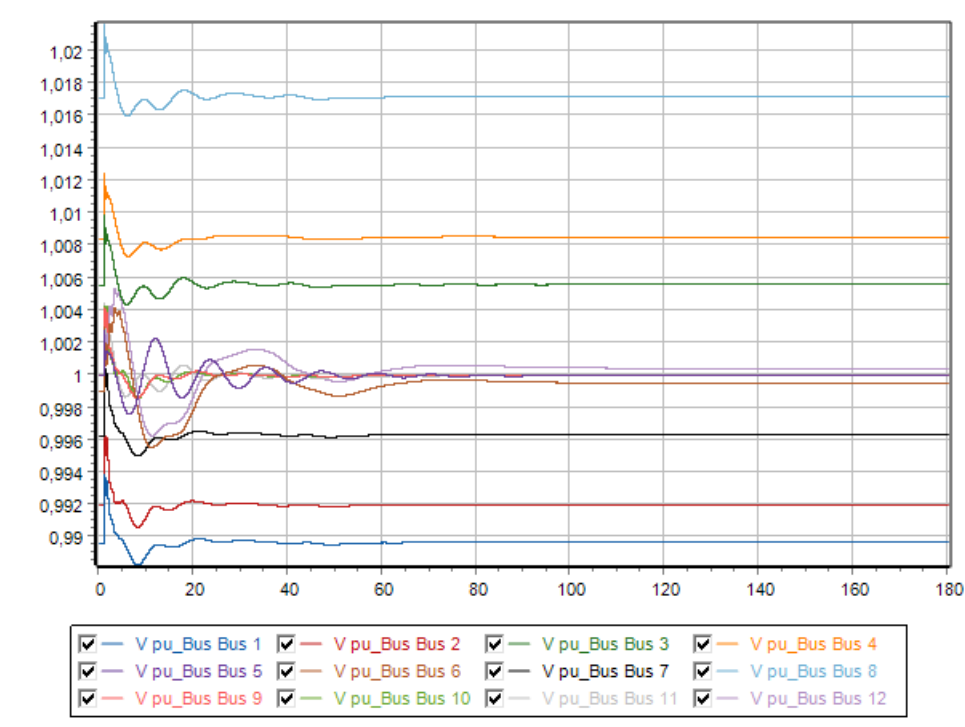
B. Τάση

Η αρχική απότομη αύξηση της συχνότητας συνοδεύεται από αύξηση της τάσης. Όσο η υπερβολική ενέργεια δεν απορροφάται άμεσα από το δίκτυο τείνει να διαταράξει τη λειτουργία του συστήματος, όπως διαπιστώνεται από την Εικόνα 6.197.

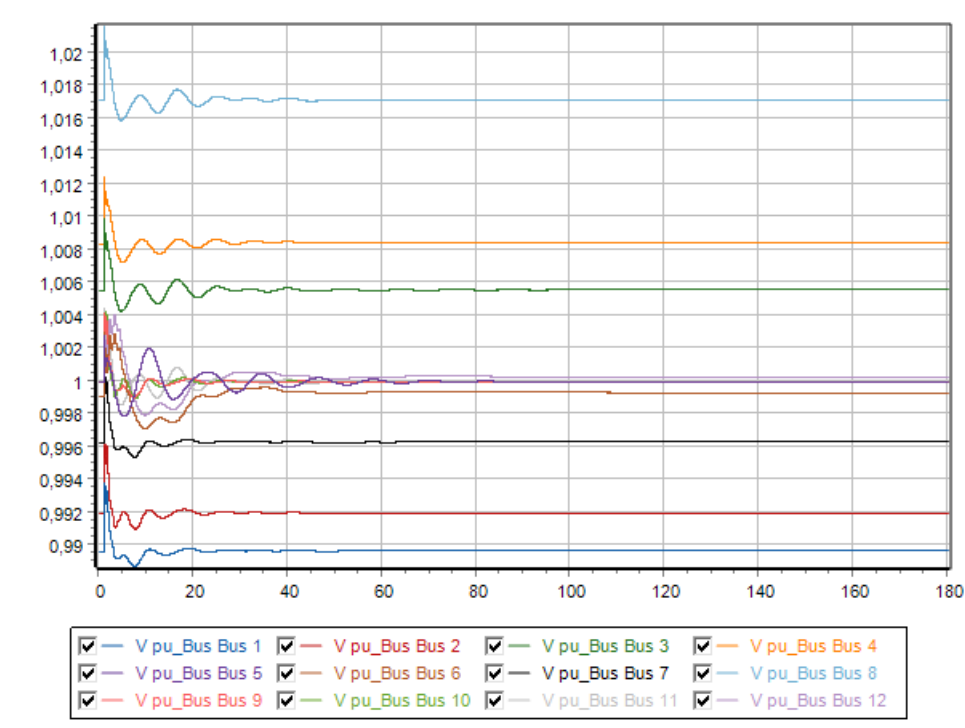
Με την ενεργοποίηση της στρατηγικής G2V, η υπερβολική ενέργεια που εισάγεται από το αιολικό πάρκο απορροφάται από τα ηλεκτρικά οχήματα, μειώνοντας την τάση του δικτύου όταν είναι υψηλή λόγω της αρχικής διαταραχής. Η τάση επιστρέφει σταδιακά στην αρχική της τιμή όταν η πλεονάζουσα ενέργεια απορροφάται, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα φορτίζουν και μειώνουν την υπερβάλλουσα ενέργεια. Οι Εικόνες 6.198, 6.199, 6.200, 6.201 και 6.202 απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης για τιμές Ddn 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.



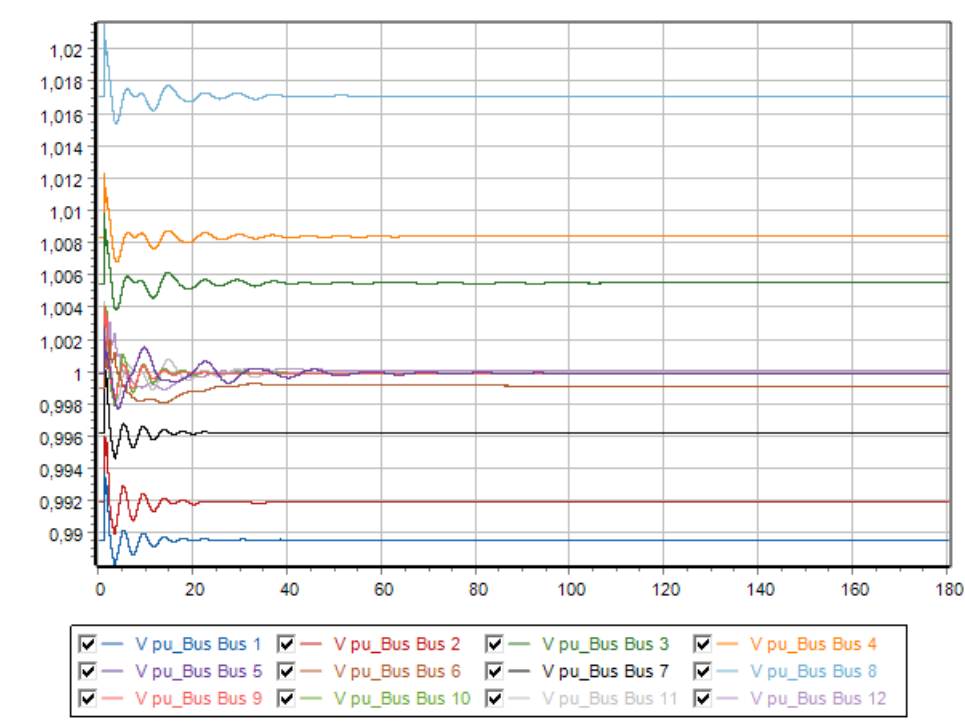
Εικόνα 6.197: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10%, απουσία G2V



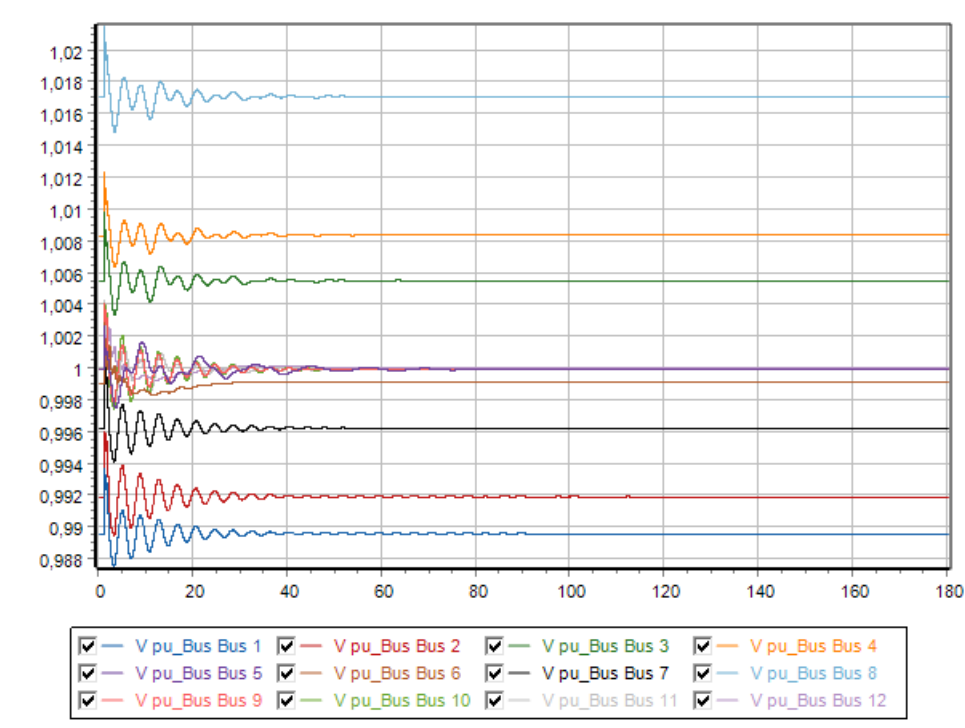
Εικόνα 6.198: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$



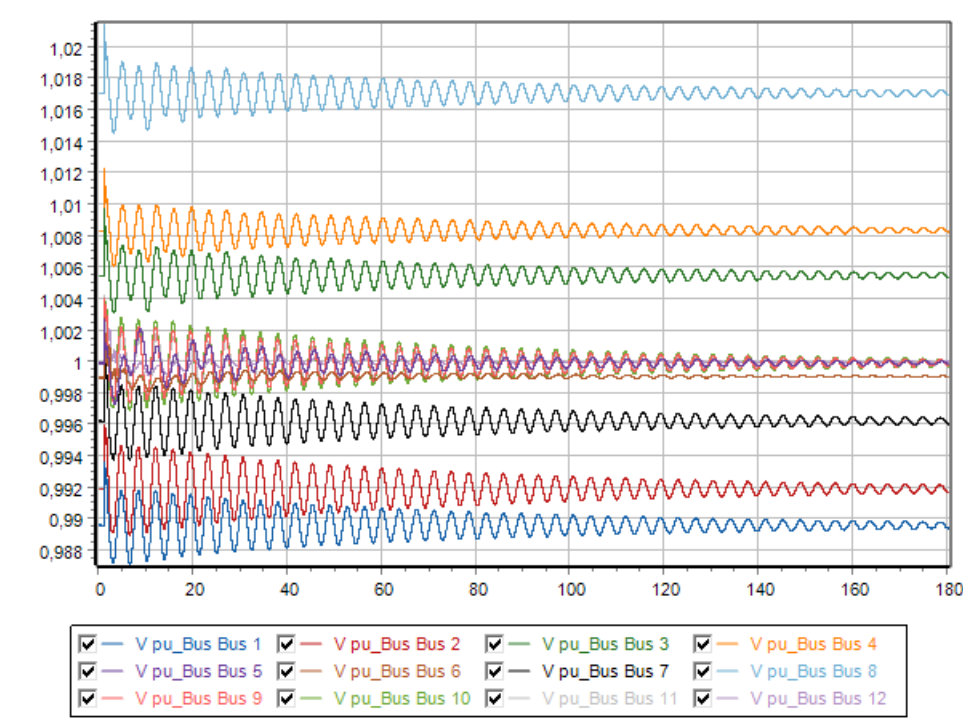
Εικόνα 6.199: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.200: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.201: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$



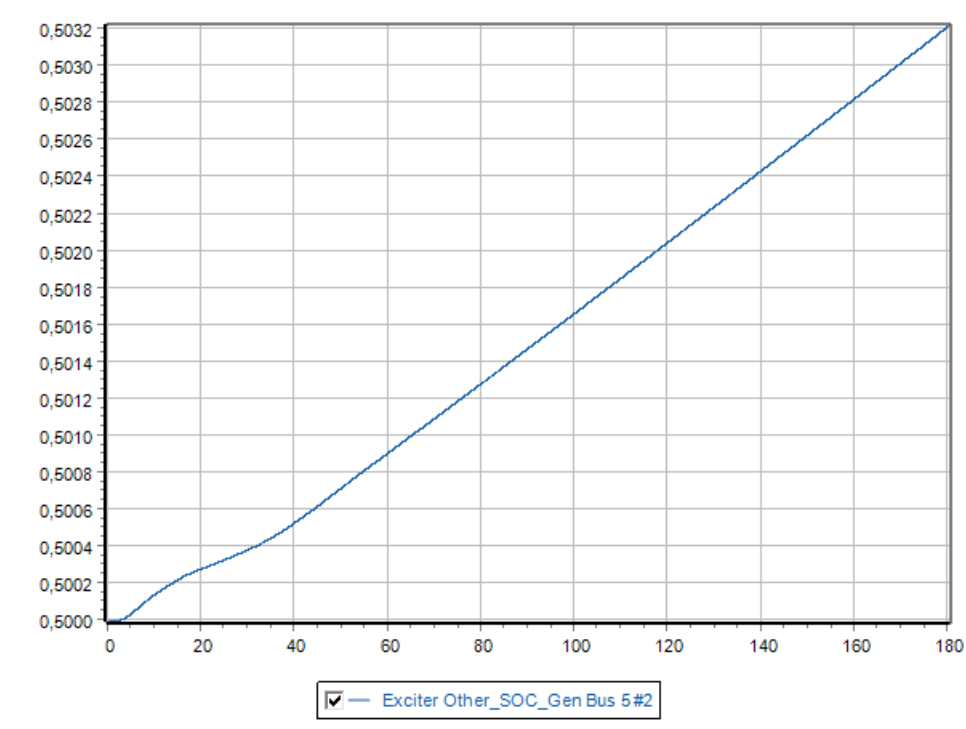
Εικόνα 6.202: Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $d_{dn} = 400$

Γ. Κατάσταση Φόρτισης

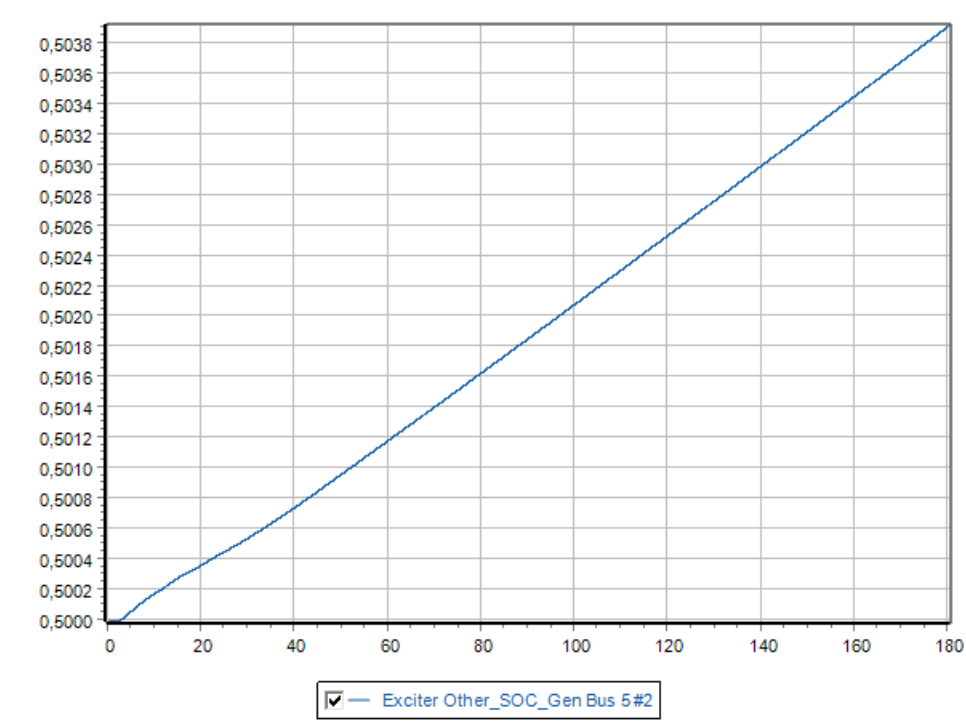
Η παράμετρος Ddn επηρεάζει τη μέθοδο προσαρμογής της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Όσο υψηλότερη είναι η Ddn, τόσο πιο έντονα και γρήγορα τα οχήματα θα αντιδράσουν στις διακυμάνσεις της συχνότητας. Οι Εικόνες 6.203, 6.204, 6.205, 6.206 και 6.207 απεικονίζουν τη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης για Ddn 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.26 συνοψίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα της μεταβολής της κατάστασης φόρτισης για τις διάφορες τιμές του Ddn.

Πίνακας 6.26: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 5.1

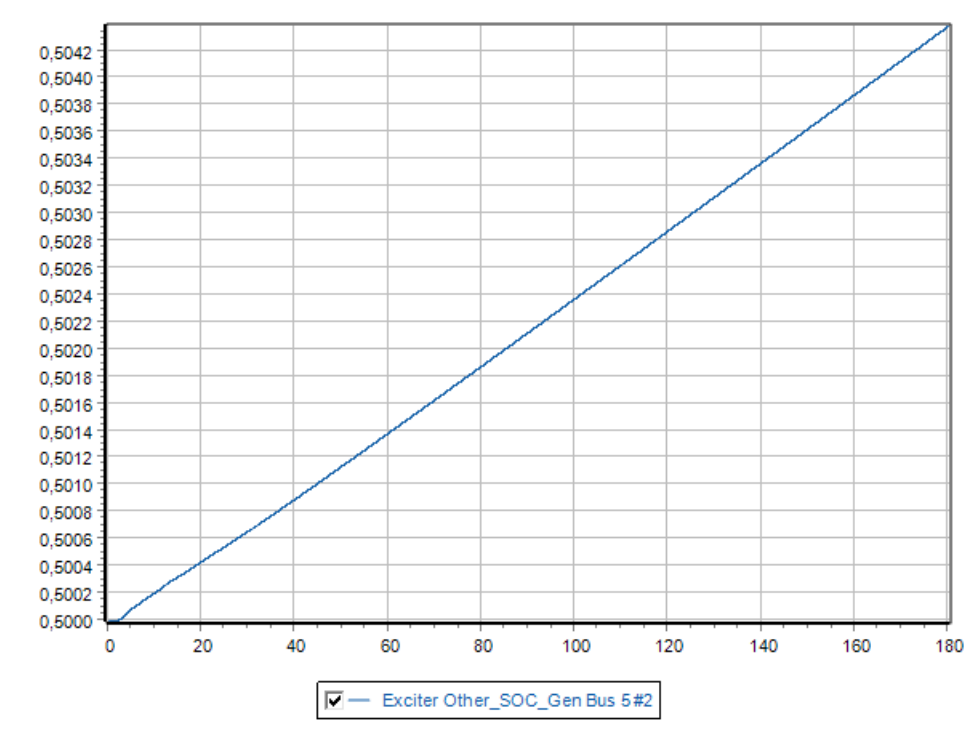
Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200	300	400
Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ΔSOC (%)	0.32	0.39	0.44	0.46	0.47



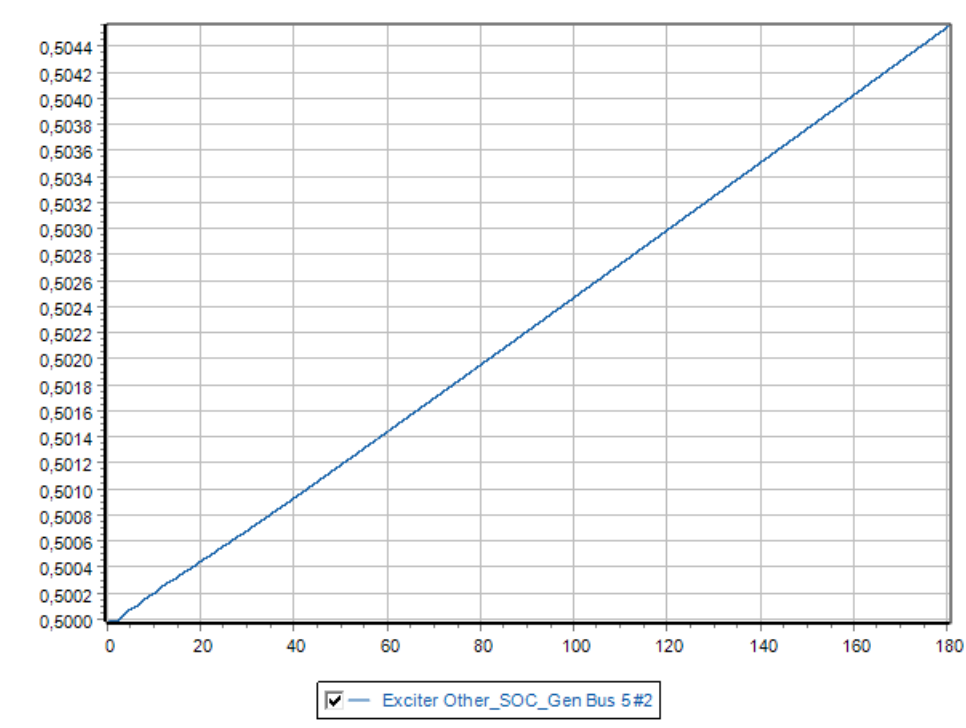
Εικόνα 6.203: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddh = 50$



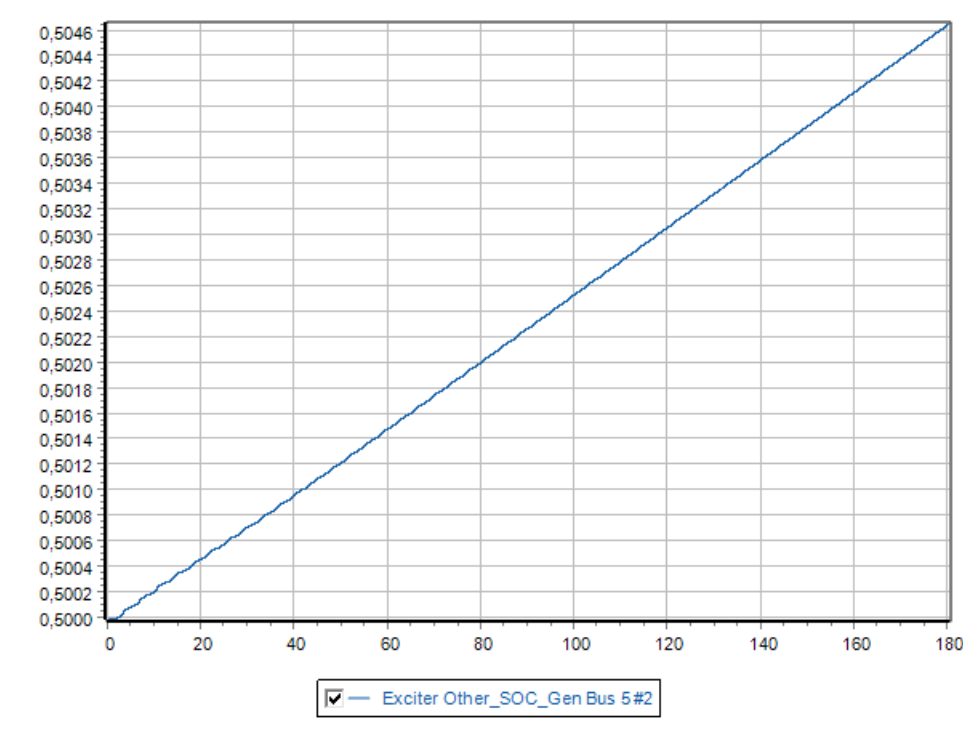
Εικόνα 6.204: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddh = 100$



Εικόνα 6.205: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.206: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$



Εικόνα 6.207: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$

Δ. Πραγματική Ισχύς και Άεργος Ισχύς

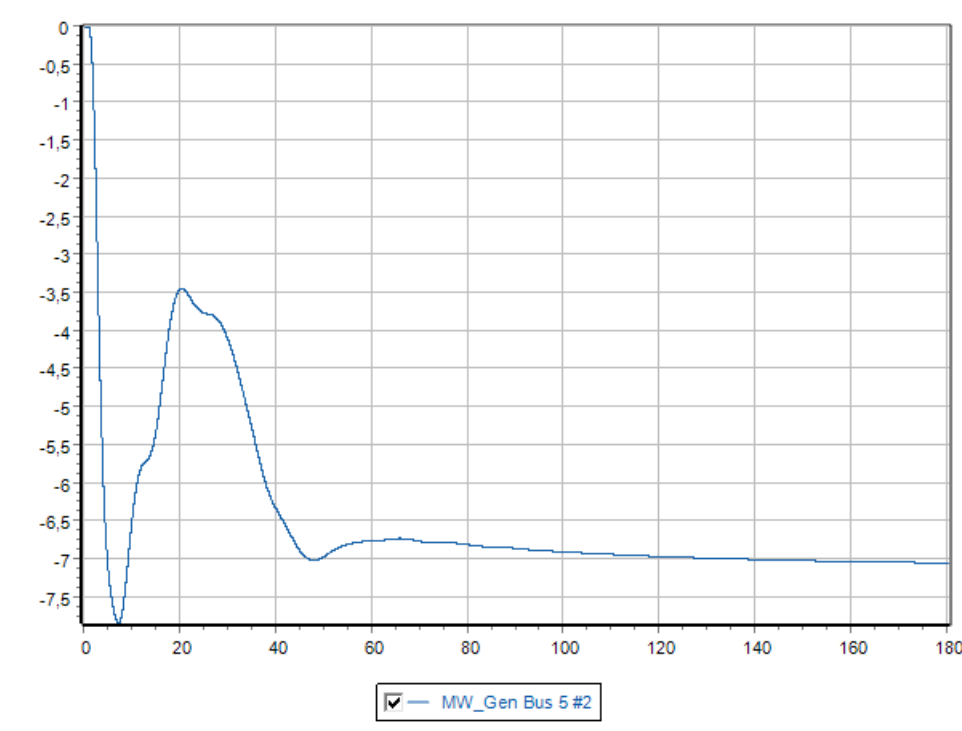
Η στρατηγική G2V (Grid-to-Vehicle) επιτρέπει την απορρόφηση της επιπλέον ενεργούς ισχύος από τα ηλεκτρικά οχήματα, μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετη ενεργή ισχύ στο δίκτυο και συμβάλλοντας στη ευστάθεια του συστήματος. Οι Εικόνες 6.208, 6.209, 6.210, 6.211 και 6.212 απεικονίζουν την μεταβολή της ενεργούς ισχύος για Ddn 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα.

Με την εφαρμογή της G2V, η απορρόφηση της επιπλέον ενεργού ισχύος μπορεί να μειώνει τη ζήτηση για άεργη ισχύ, καθώς το δίκτυο προσαρμόζεται καλύτερα στην νέα κατάσταση . Οι Εικόνες 6.213, 6.214, 6.215, 6.216 και 6.217 απεικονίζουν την μεταβολή της αέργου ισχύος για Ddn 50, 100, 200, 300 και 400, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.27 συνοψίζει τα αποτελέσματα της ενεργού και αέργου ισχύος για τις διάφορες τιμές του συντελεστή Ddn .

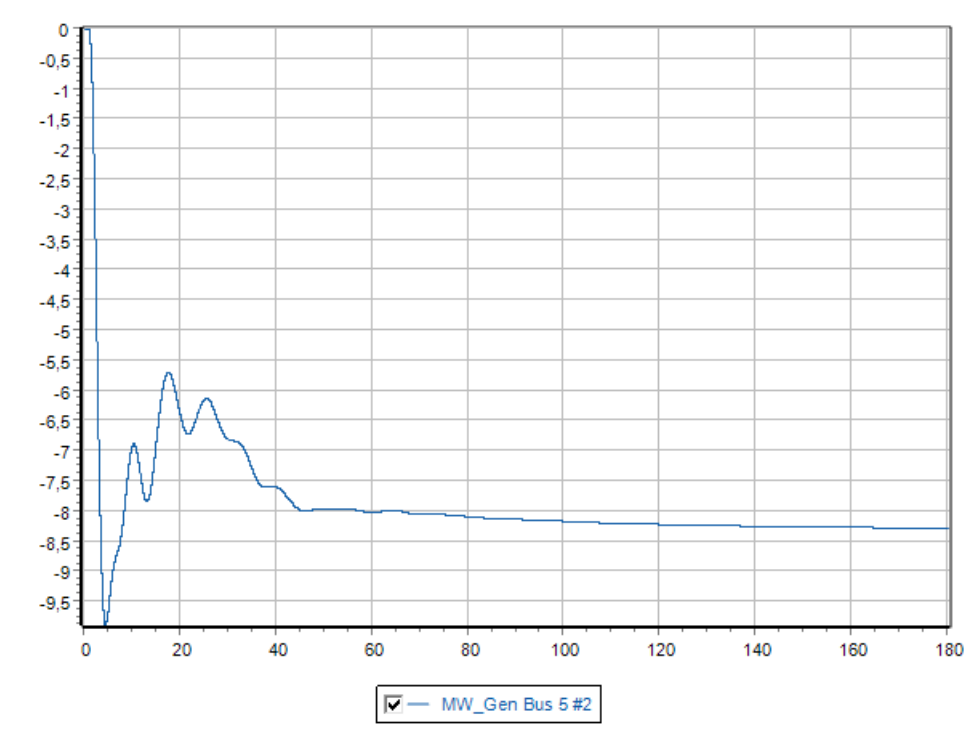
Πίνακας 6.27: Αποτελέσματα κατάστασης φόρτισης Σεναρίου 5.1

Συντελεστής Ddn (pu)	50	100	200	300	400
Πραγματική Ισχύς (MW)	-7.05	-8.28	-9.07	-9.36	-9.52

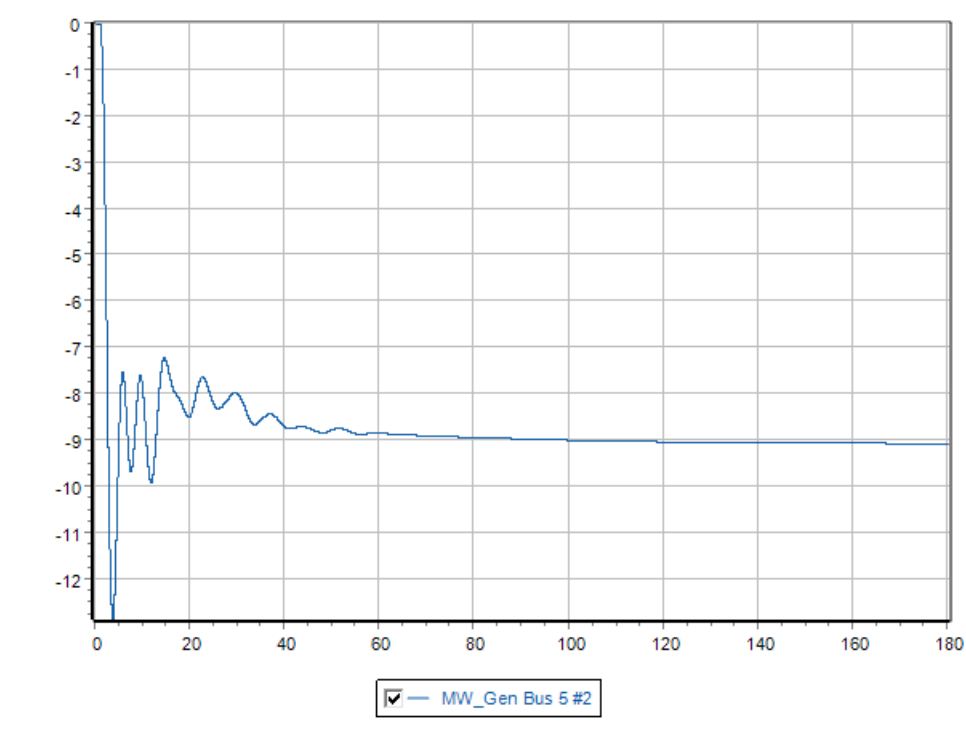
Άεργος Ισχύς (MVAR)	-14.25	-14.03	-13.89	-13.84	-13.81
---------------------	--------	--------	--------	--------	--------



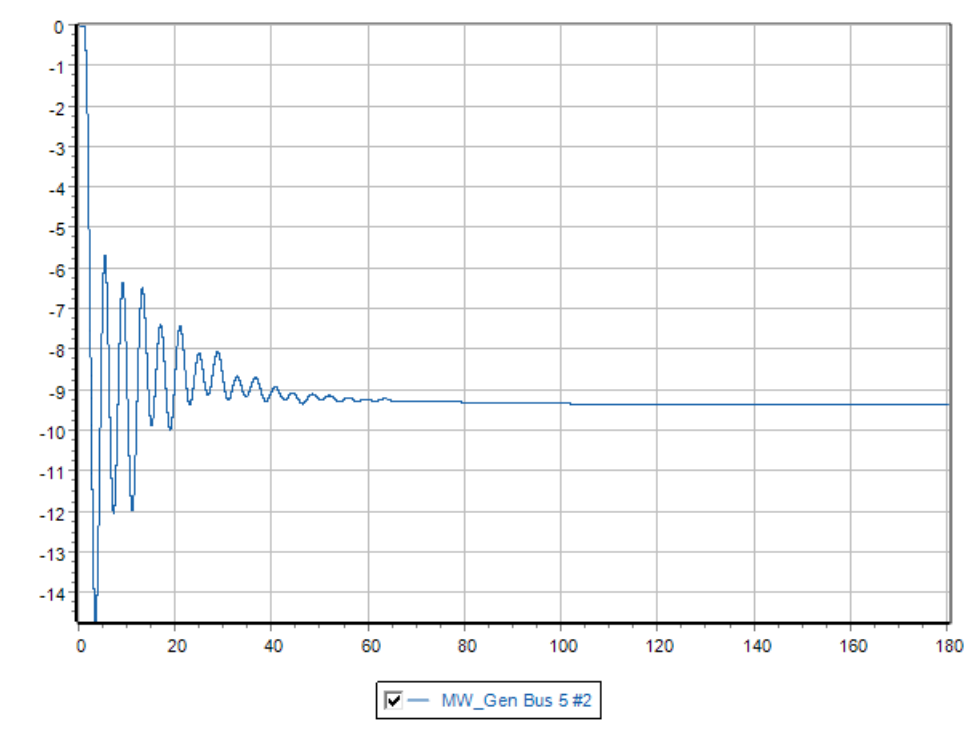
Εικόνα 6.208: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$



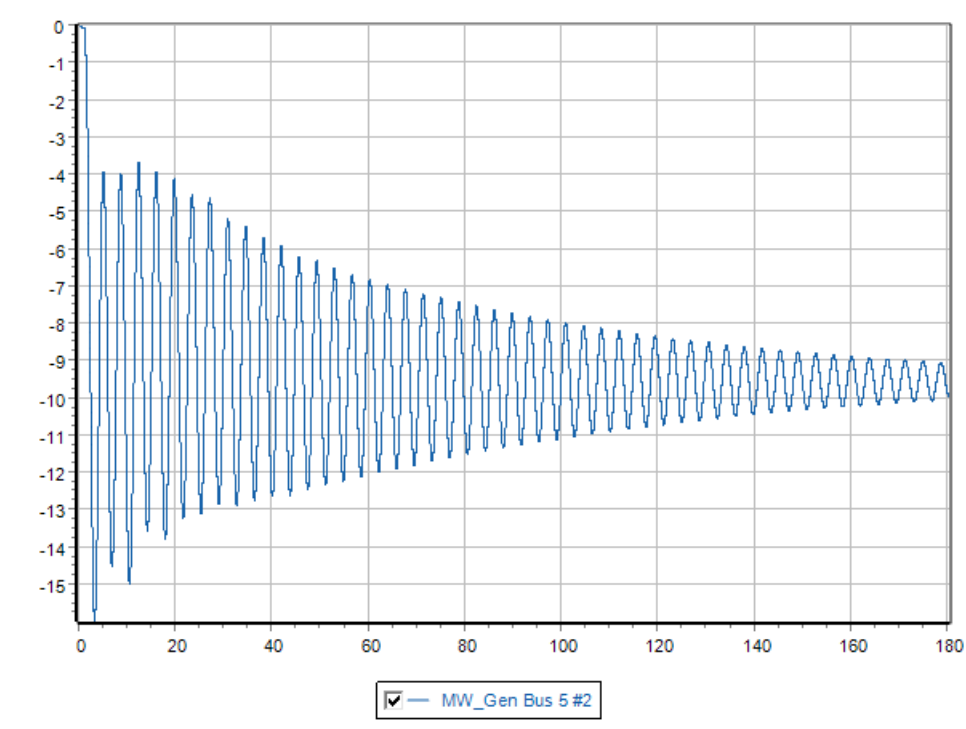
Εικόνα 6.209: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$



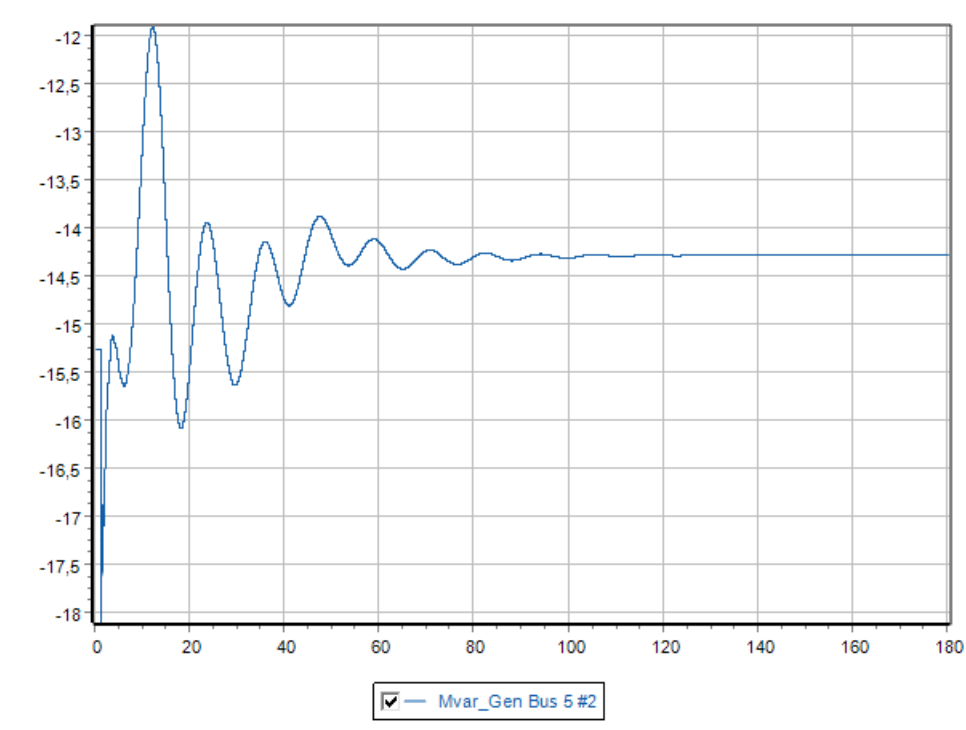
Εικόνα 6.210: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$



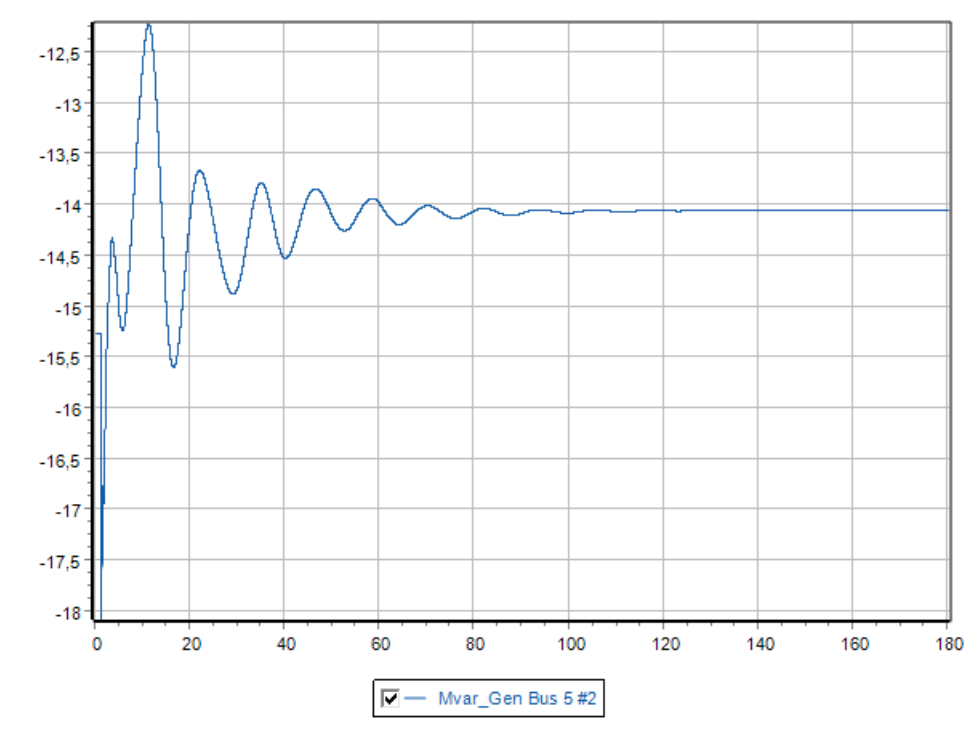
Εικόνα 6.211: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$



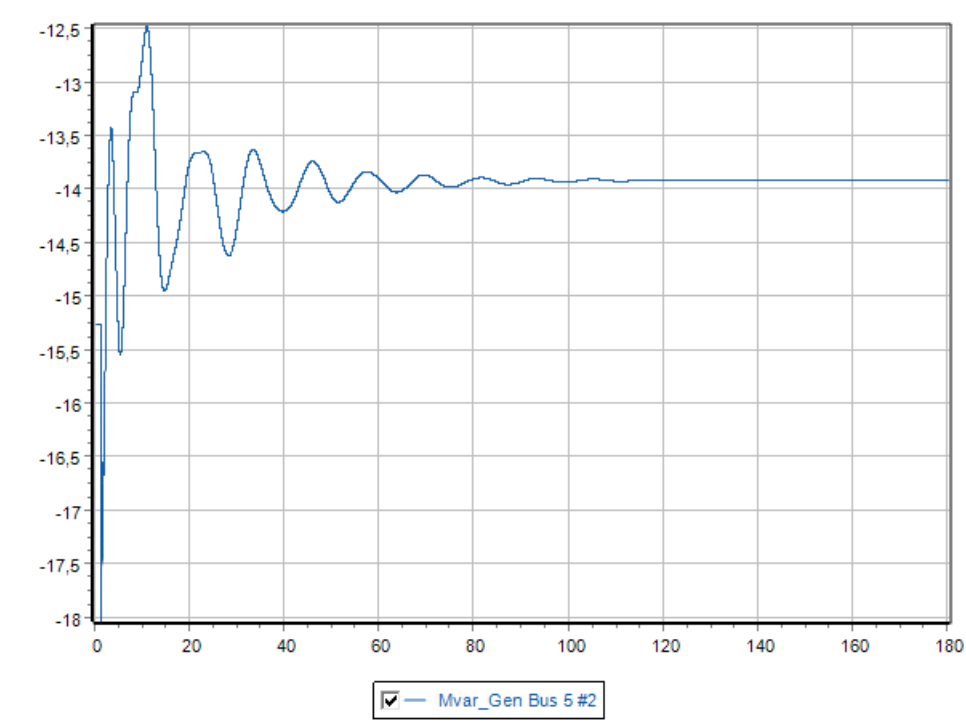
Εικόνα 6.212: Πραγματική ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$



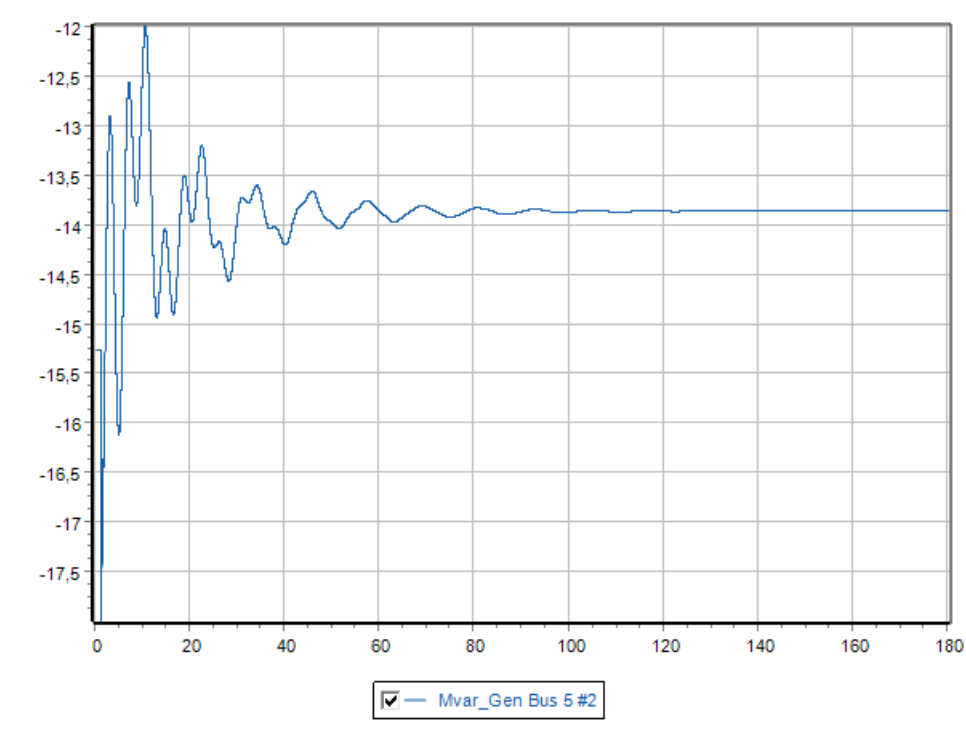
Εικόνα 6.213: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 50$



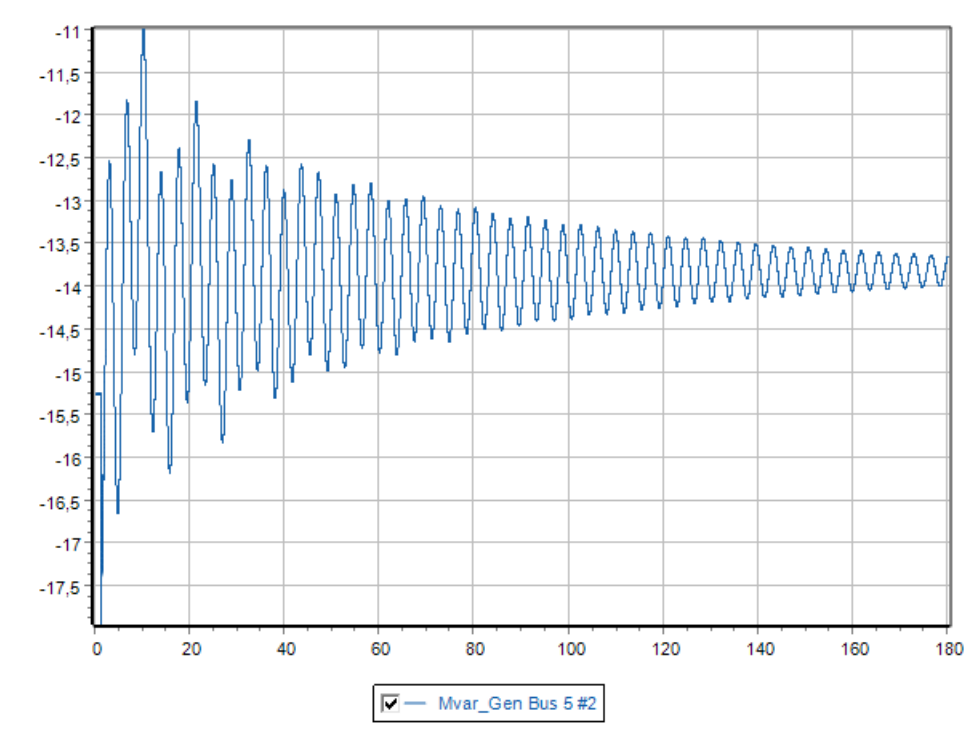
Εικόνα 6.214: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 100$



Εικόνα 6.215: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 200$



Εικόνα 6.216: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 300$



Εικόνα 6.217: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση με τον χρόνο, μετά την αύξηση της παραγωγής του αιολικού πάρκου κατά 10% ,παρουσία G2V με $ddn = 400$

6.2 Σύνοψη και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η μελέτη που προηγήθηκε εξέτασε αρχικά τη συμπεριφορά ενός συστήματος 12 ζυγών όταν επιδέχεται διαταραχές που αφορούν τη διαθεσιμότητα της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μεταβολές στις απαιτήσεις του φορτίου. Στη συνέχεια, εξετάστηκε με τη βοήθεια ενός αποθηκευτικού μέσου ενέργειας, το οποίο αναπαριστά τη διαδικασία έξυπνης αμφίδρομης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η επίδραση που θα έχει στην ευστάθεια του συστήματος, λειτουργώντας με τη στρατηγική του περιορισμένου ελέγχου για ρύθμιση συχνότητας.

Με την παρατήρηση των διαγραμμάτων του λογισμικού, εντοπίστηκε ότι οι ρυθμιστές ταχύτητας ενώ αντιδρούν στις μεταβολές δεν λειτουργούν πλήρως ικανοποιητικά στα σενάρια που εξετάστηκαν. Οι ρυθμιστές δεν ανταποκρίνονται επαρκώς στις διαταραχές, προκαλώντας μεγάλες διακυμάνσεις στη συχνότητα.

Επαληθεύεται, όμως, ότι η διαδικασία V2G μπορεί όντως να βελτιώσει την ευστάθεια του συστήματος προσφέροντας την διαδικασία πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας και διατηρώντας ένα μόνιμο σφάλμα. Η αποκατάσταση της ευστάθειας συχνότητας καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της στρατηγικής ελέγχου. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των οχημάτων που είναι συμμετέχοντες και η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίζει τις διαταραχές, καθώς επηρεάζει την μέγιστη δυνατότητα παραγωγής πραγματικής ισχύος P_{max} . Μια μεγαλύτερη χωρητικότητα μπορεί να συμβάλλει στην εξομάλυνση των μεγαλύτερων διακυμάνσεων στην παραγωγή και τη ζήτηση. Παρατηρήθηκε όμως ότι η ρύθμιση της συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και σε σενάρια όπου η ζήτηση ήταν μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη ενέργεια από τον στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό επισημαίνει την ευελιξία της τεχνολογίας V2G, η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική ρύθμιση της συχνότητας, ακόμη και όταν οι πόροι είναι περιορισμένοι.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι οι συντελεστές D_{up} και D_{dn} . Η αυξημένη τιμή συντελεστών σε συστήματα μπαταρίας μπορεί να βελτιώσει την ισορροπία του συστήματος σε ορισμένα σενάρια, επιτυγχάνοντας τη σταθεροποίηση της. Ωστόσο, σε άλλα σενάρια, υπάρχει ένα άνω όριο πέρα από το οποίο οι αυξήσεις των συντελεστών δεν οδηγούν σε περαιτέρω βελτίωση αλλά δυσχεραίνουν τις αποκρίσεις και το σύστημα μπορεί να μην καταφέρει να ισορροπήσει πλήρως.

Τέλος, ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα αφορά τις μεταβολές στην κατάσταση φόρτισης όταν συντελείται ρύθμιση συχνότητας. Τα συμβάντα που απαιτούν πρωτεύουσα ρύθμιση

συχνότητας είναι συνήθως σύντομης διάρκειας και αν πολλά οχήματα συνεισφέρουν ταυτόχρονα, η επίδραση στην κατάσταση φόρτισης κάθε οχήματος είναι αμελητέα. Σε αυτό το μικρό χρονικό διάστημα, τα ηλεκτρικά οχήματα απορροφούν ή αποδίδουν μικρή ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται σημαντική αλλαγή στα ποσοστά φόρτισής τους.

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

7.1 Συμπεράσματα και Προκλήσεις

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, προσανατολίστηκε στη μελέτη μίας καινοτόμου τεχνολογίας χρησιμοποιώντας ένα εύχρηστο και εύκολα προσβάσιμο λογισμικό, το PowerWorld Simulator. Αυτό αναδεικνύει ότι ακόμη και μία προηγμένη ιδέα μπορεί να αντιμετωπιστεί από απλά μέσα και να εξάγει επαρκώς αξιόπιστα αποτελέσματα. Ακόμη, αναγνωρίζεται από την εκτεταμένη παρουσία του στη βιβλιογραφία, ότι το θέμα το οποίο μελετήθηκε προκαλεί μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Τέλος, η συνδυαστική μελέτη πολλών διαφορετικών σταθμών παραγωγής αναβαθμίζει την μελέτη προσπαθώντας να προσομοιώσει μία πολυδιάστατη πραγματικότητα του ενεργειακού συστήματος.

Ωστόσο, η έρευνα παρουσίασε αρκετές προκλήσεις και δυσκολίες στην εκτέλεση της. Η τεκμηριωμένη αναπαράσταση των διαφορετικών σταθμών παραγωγής αποδείχθηκε δύσκολη. Επίσης, η παράσταση της έξυπνης φόρτισης μέσω του PowerWorld Simulator απαιτήσε να γίνουν ορισμένες παραδοχές για την απλοποίηση της μελέτης, καθώς πρόκειται για λογισμικό προσομοίωσης συστημάτων ενέργειας και όχι διαχείρισης σημείων φόρτισης.

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στη διερεύνηση του θέματος προσφέροντας μία ουσιαστικότερη κατανόηση των στρατηγικών ελέγχου και των παραμέτρων που εμπλέκονται με αυτές. Συγκεκριμένα, στόχος είναι να γίνει πειραματικά κατανοητό πώς οι μεταβολές σε κρίσιμες παραμέτρους επηρεάζουν τη συνολική αποδοτικότητα και τα βασικά μεγέθη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σύνολο της, η έρευνα, ανέδειξε συμπεράσματα που αφορούν τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας μέσω της έξυπνης φόρτισης και ότι αυτή μπορεί όντως να βοηθήσει στην βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης αρκεί τα συστήματα να είναι προσαρμοσμένα κατάλληλα.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η εργασία επικεντρώθηκε στην απλή προσέγγιση και μελέτη της συμβολής της έξυπνης φόρτισης διπλής κατεύθυνσης (V2G) στην ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου,

βασιζόμενη σε στρατηγική ελέγχου που έχει αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία. Παρά τα ευρήματα της μελέτης, υπάρχουν πολλές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και επέκταση.

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εξέταση κάποιας άλλης στρατηγικής ελέγχου η οποία λαμβάνει υπόψη το προφίλ του οδηγού, δηλαδή τις συνήθειες μετακίνησης και τις συνήθειες ώρες φόρτισης καθώς και την επιθυμητή τελική κατάσταση φόρτισης. Μέσω αυτής της αντιμετώπισης θα εξεταστεί η διαχείριση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παράλληλα με τις ατομικές ανάγκες των χρηστών.

Εναλλακτικά, η ανάλυση του κόστους και των κερδών που απολαμβάνουν οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων σε διάφορες περιπτώσεις φόρτισης θα μπορούσε να προσφέρει πολύτιμα στοιχεία. Αυτή η ανάλυση θα μπορούσε να βοηθήσει στη κατανόηση των οικονομικών συναλλαγών μεταξύ χρήστη και παρόχων δικτύου και στην εκτίμηση των οικονομικών κινήτρων για τους χρήστες σχετικά με την υιοθέτηση της τεχνολογίας V2G.

Αυτές οι προτάσεις μπορούν να προσφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη και σφαιρική κατανόηση τόσο των προκλήσεων όσο και των ευκαιριών που σχετίζονται με τη έξυπνη διαχείριση της ενέργειας και ιδιαίτερα με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας V2G στο δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] Rochelle F., History of Electricity, November 2016, Second Edition
- [2] Sørensen, B. (1991). A history of renewable energy technology. *Energy Policy*, 19(1), 8–12.
- [3] Burton N., History of Electric Cars. In *The Crowood Press*, 2013
- [4] Walkers are Welcome UK network. <https://walkersarewelcome.org.uk/wp-content/themes/yootheme/cache/33/Thomas-Parker-Electric-Car-larger-33d0651f.webp>
- [5] Μαλατέστας Π., Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η έκδοση
- [6] Βοβός Ν., Γιαννακόπουλος Γ., Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη
- [7] *Smart grids – IEA* <https://www.iea.org/energy-system/electricity/smart-grids>
- [8] Shuva P., Md Sajed Rabbani, Ripon Kumar Kundu, Sikdar Mohammad Raihan Zaman, A Review of Smart Technology (Smart Grid) and Its Features, January 2014
- [9] Kabalci, E., & Kabalci, Y. (Eds.). (2019). *Smart Grids and Their Communication Systems*. Springer Singapore.
- [10] *Green Deal* <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/>
- [11] Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, Νοέμβριος 2019
- [12] Εθνικό Σχέδιο Ηλεκτροκίνησης, Μάιος 2023
- [13] Dr. B. Kalyan Kumar, Power System Stability and Control
- [14] ΑΔΜΗΕ, Καθορισμός Ζωνικών/Συστημικών αναγκών Ισχύος Εξισορρόπησης, Έκδοση 1^η, Αύγουστος 2020
- [15] Hansen, A. D., Sørensen, P. E., Zeni, L., & Altin, M. (2016). Frequency control modelling - basics. DTU WindEnergy E Vol. 0103
- [16] Raj Kumar Jaganathan, Tapan Kumar Saha, Voltage Stability Analysis of Grid Connected Embedded Generators, September 2004
- [17] Κιοσκερίδης Ι., Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η έκδοση

- [18] Ravi Kiran Karre, Kasangottu Srinivas, Khaja Mannan, B. Prashanth, Ch. Rajendra Prasad, A Review on Hydro Power Plants and Turbines, 2022
- [19] CNC TVAR, Precision CNC machining power
https://www.cnctvar.cz/products/index_files/image-99.jpg
- [20] (Firm), K. (Ed.). (2006). Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics (2nd ed.). Springer.
- [21] WECC Specification of the Second Generation Generic Models for Wind Turbine Generators, 2013
- [22] Wind Turbine Technologies - ESIG <https://www.esig.energy/wiki-main-page/wind-turbine-technologies/>
- [23] WECC Renewable Energy Modeling Task Force: WECC Wind Power Plant Dynamic Modeling Guide, November 2010
- [24] O. ACHKARI*1, A. EL FADAR, Renewable Energy Storage Technologies – A Review, July 2018
- [25] V. V. Shimin, Varsha A Shah, Makarand M Lokhande, Electric vehicle batteries: A selection based on PROMETHEE method, 2016
- [26] Nour, M., Chaves-Ávila, J. P., Magdy, G., & Sánchez-Miralles, Á. (2020a). Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems. *Energies*, 13(18), 4675.
- [27] Charles River Associates, Introduction to V2G: A critical technology to enable the energy transition, September 2022
- [28] Vadi, Bayindir, Colak, & Hossain. (2019). A Review on Communication Standards and Charging Topologies of V2G and V2H Operation Strategies. *Energies*, 12(19), 3748.
- [29] Environmental Coalition on Standards, Standards for EV smart charging: A guide for local authorities, December 2022
- [30] AVTA, Vehicle-to-Grid (V2G) Power Flow Regulations and Building Codes Review by the AVTA

- [31] Shariff, S. M., Iqbal, D., Saad Alam, M., & Ahmad, F. (2019). A State of the Art Review of Electric Vehicle to Grid (V2G) technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561, 012103.
- [32] Andersen, P. B., Hashemi Toghroljerdi, S., Sørensen, T. M., Christensen, B. E., Høj, J. C. M. L., & Zecchino, A.(2019). The Parker Project: Final Report. Technical University of Denmark.
- [33] Energy Saving Trust Organization, Powerloop Vehicle-to-Grid trial
- [34] Scarabaggio, P., Carli, R., Cavone, G., & Dotoli, M. (2020). Smart Control Strategies for Primary Frequency Regulation through Electric Vehicles: A Battery Degradation Perspective. *Energies*, 13(17), 4586.
- [35] Andrzej Adamczyk, Mufit Altin, Ömer Göksu, Remus Teodorescu, and Florin Iov, Generic 12-Bus Test System for Wind Power Integration Studies, 2013
- [36] WECC Guideline: Typical Machine Data for Power System Simulation Modeling, 2014
- [37] WECC Renewable Energy Modeling Task Force, WECC Battery Storage Dynamic Modeling Guideline, November 2016

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στοιχεία δοκιμαστικού συστήματος

Πίνακας Α.1: Ονομαστικές Τιμές Λειτουργίας Γεννητριών

Γεννήτρια	Ζυγός	Ονομαστική Ισχύς [MVA]	Ονομαστική Τάση [kV]
1	9	750	13.8
2	10	640	13.8
3	11	384	13.8
4	12	474	13.8

Πίνακας Α.2: Ονομαστικές Τιμές Λειτουργίας Μετασχηματιστών

A/A	Ζυγός Αναχώρησης – Ζυγός Άφιξης	Ονομαστική Ισχύς [MVA]	Λόγος Μετασχηματισμού	Επαγωγική Αντίδραση X [pu]
1	1-7	500	230 kV/ 345 kV	0.01
2	1-9	800	13.8 kV / 230 kV	0.01
3	2-10	700	13.8 kV / 230 kV	0.01
4	3-8	500	230 kV/ 345 kV	0.01
5	3-11	400	13.8 kV/ 230 kV	0.01
6	6-12	500	13.8 kV/ 230 kV	0.01

Πίνακας Α.3: Δεδομένα Γραμμών Μεταφοράς

A/A	Ζυγός Αναχώρησης – Ζυγός Άφιξης	Μήκος [km]	Τάση [kV]	Ωμική Αντίσταση R [pu]	Επαγωγική Αντίδραση X [pu]	Επιδεκτικότητα B [pu]
1	1-2	100	230	0.01131	0.08998	0.18377

2	1-6	300	230	0.03394	0.26995	0.55130
3	2-5	400	230	0.0453	0.3599	0.7351
4	3-4 (x2)	100 (x2)	230	0.0057	0.0450	0.3675
5	4-5	150	230	0.0170	0.1350	0.2757
6	4-6	300	230	0.03394	0.26995	0.55130
7	7-8	600	345	0.0159	0.1721	3.2853

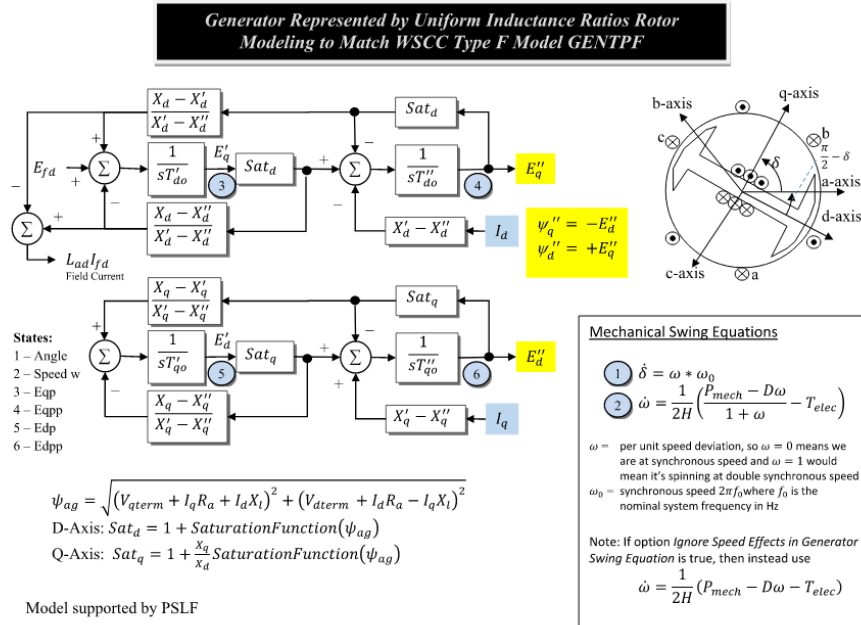
Πίνακας Α.4: Δεδομένα Ζυγών για την Ανάλυση Ροής Φορτίου

Ζυγός	Είδος Ζυγού	Μέτρο Τάσης [pu]	Πραγματική Παραγόμενη Pgen [MW]	Πραγματική Ισχύς φορτίου P _{load} [MW]	Άεργος Ισχύς Φορτίου Q _{load} [MW]	B _{shunt} [pu]
1	Ζυγός Φορτίου	-	-	300	186	-
2	Ζυγός Φορτίου	-	-	250	121	-
3	Ζυγός Φορτίου	-	-	350	115	-
4	Ζυγός Φορτίου	-	-	300	186	2
5	Ζυγός Φορτίου	-	100	100	48	0.4
6	Ζυγός Φορτίου	-	-	150	49	-
7	Ζυγός Φορτίου	-	-	-	-	-1
8	Ζυγός Φορτίου	-	-	-	-	-
9	Ζυγός Αναφοράς	1.00	-	-	-	-
10	Ζυγός Παραγωγής	1.01	400	-	-	-

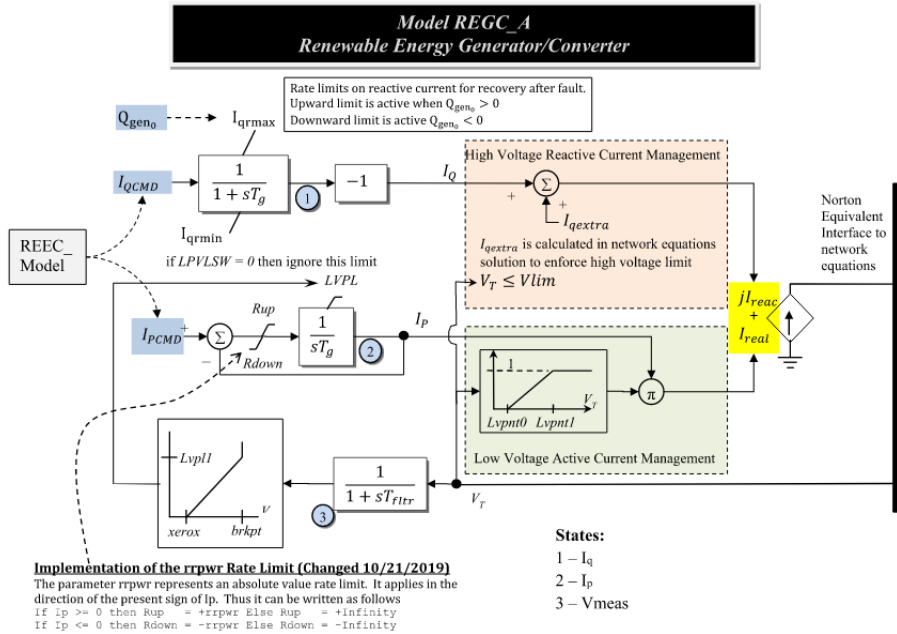
11	Ζυγός Παραγωγής	1.01	270	-	-	-
12	Ζυγός Παραγωγής	1.01	330	-	-	-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

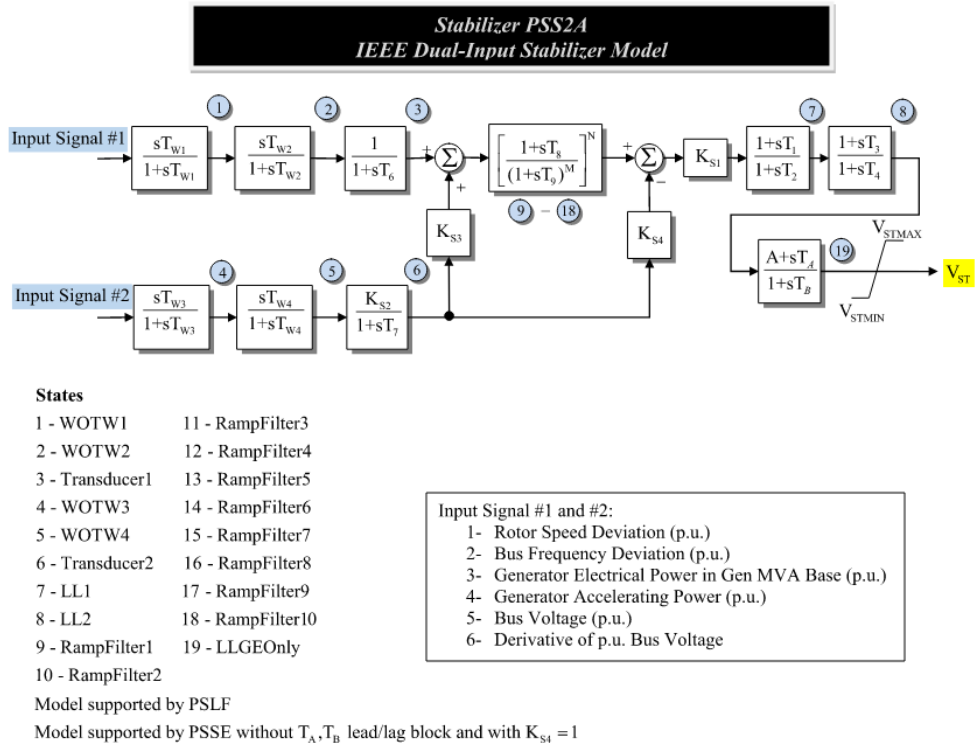
Διαγράμματα μπλοκ μοντέλων προσομοίωσης



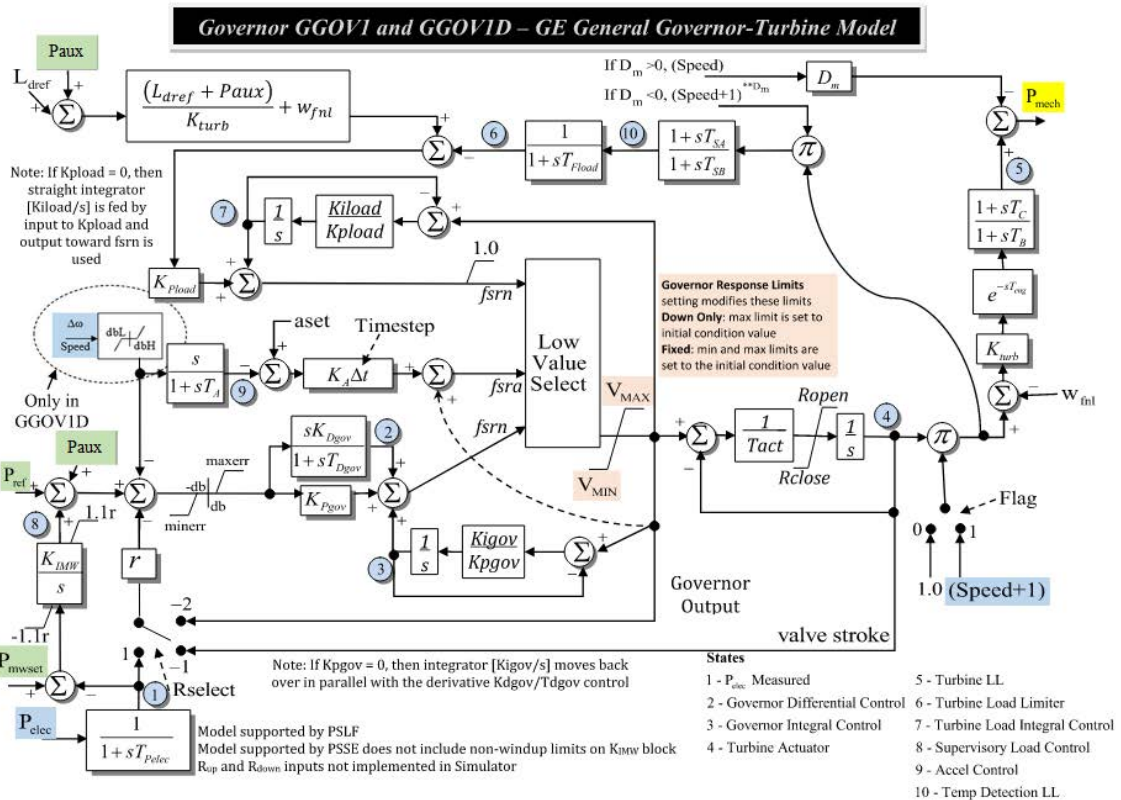
Εικόνα Β.1: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου μηχανής GENTPJ



Εικόνα Β.2: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλων μηχανής REGC_A

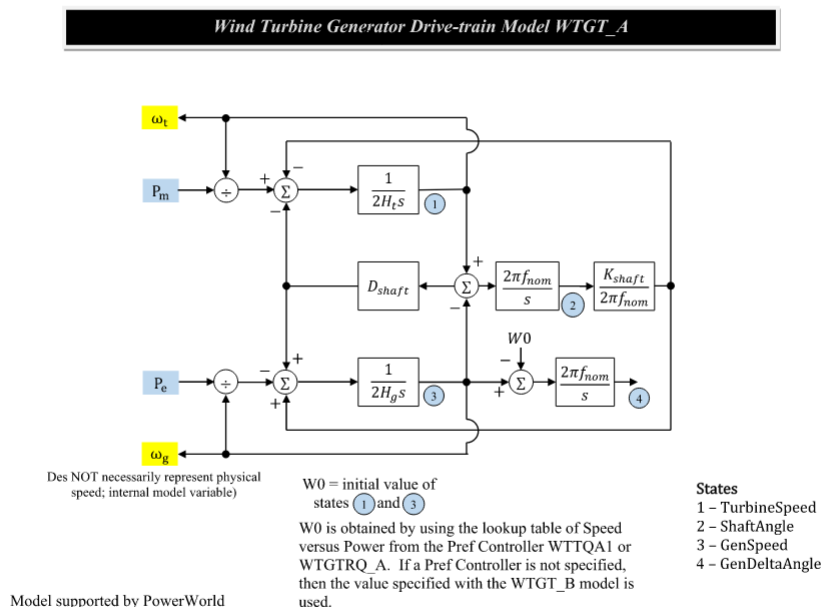


Εικόνα Β.5: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου σταθεροποιητή PSS2A

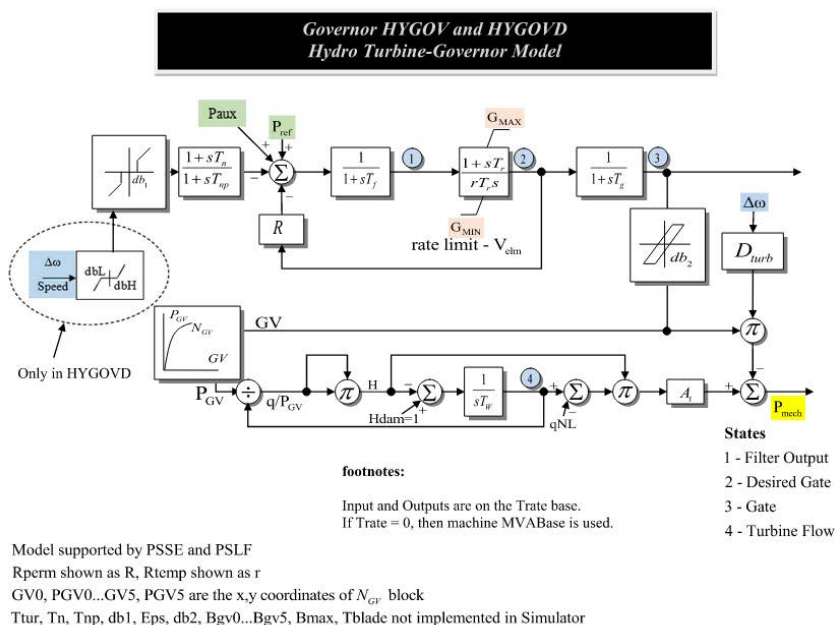


Εικόνα Β.6: Διάγραμμα μπλοκ ρυθμιστή ταχύτητας GGOV1

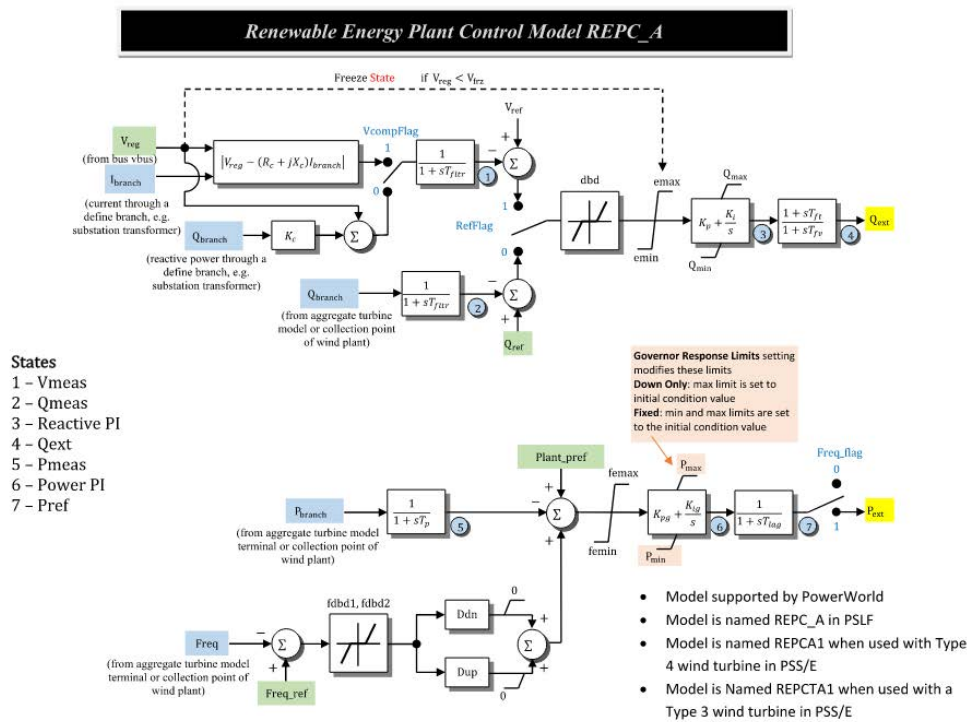
Governor WTGT_A



Εικόνα Β.7: Διάγραμμα μπλοκ μοντέλου εξομοίωσης του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης WTGT_A

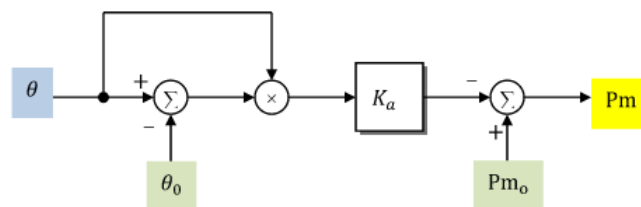


Εικόνα Β.8: Διάγραμμα μπλοκ ρυθμιστή ταχύτητας ΥΗΣ HYGOV



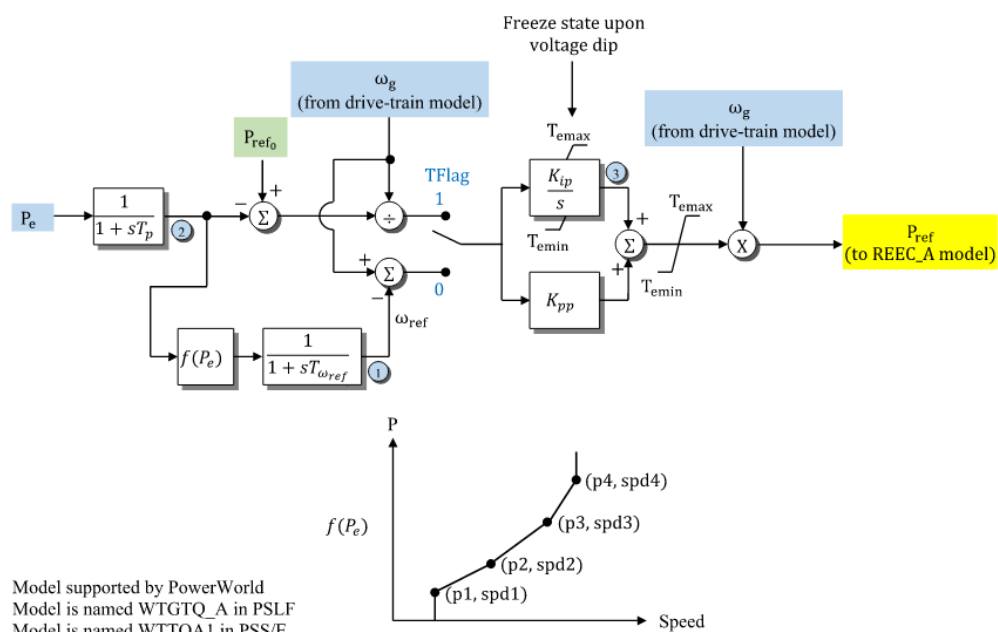
Εικόνα Β.9: Διάγραμμα μπλοκ ελεγκτή REPC_A

Wind Turbine Generator Aero-dynamic Model WTGAR_A and WTAR1



Εικόνα Β.10: Διάγραμμα μπλοκ αεροδυναμικού μοντέλου WTGAR_A

Wind Turbine Generation Torque Model WTGTRQ_A



Εικόνα Β.11: Μοντέλο ελέγχου ροπής Α/Γ WTRQ_A